

Lastpfadoptimierte Strukturbauteile aus duroplastischen Wickelstrukturen mit thermoplastischem Spritzguss

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität
Kaiserslautern-Landau
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Philipp Bauer, M.Sc.

aus Coburg

2023

Tag der mündlichen Prüfung: 28. April 2023
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. P. J. Geiß
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Hausmann
Prof. Dr.-Ing. I. Müller
PD Dr.-Ing. habil. D. May

D386

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Festigkeitslehre und Leichtbau der Hochschule Pforzheim, in Kooperation mit dem Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) in Kaiserslautern.

Mein höchster Dank gilt meinem wissenschaftlichem Mentor, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ingolf Müller, der in all den Jahren den Weg für diese Arbeit ebnete. Ohne seine konstante Unterstützung, seine unermüdlichen Anstrengungen sowie unzählige Diskurse, wäre die vorliegende Arbeit in dieser Form nicht realisierbar gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing Joachim Hausmann danke ich für die Ermöglichung der Promotion am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe, die hervorragende Betreuung der Arbeit, den vielen Anmerkungen in den Diskussionsrunden sowie der Übernahme des Hauptgutachtens.

Darüber hinaus danke ich Herrn PD Dr.-Ing habil. David May für die Übernahme eines Korreferats, der Durchsicht der Arbeit sowie den eingebrachten Anmerkungen.

Des Weiteren möchte ich Frau Dr.-Ing. Nicole Motsch-Eichmann und Herrn Dr.-Ing. Sebastian Schmeer vom IVW für die hervorragende Unterstützung, die vielfältigen Diskussionen und dem großen Interesse an meiner Arbeit danken. Zusätzlich möchte ich Herrn Prof. J. Wrede der Hochschule Pforzheim für die langfristigen Bemühungen danken.

Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Mitarbeitenden der Fakultät für Technik der Hochschule Pforzheim bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Vor allem den Kollegen M. Burkhardt, M. Gerth, M.Sc., Dipl.-Ing. M. Hauer und K. Schnepfer. Mein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitenden und Studierenden des Leichtbau-Labors, insbesondere den Herren E. Grabowski, M.Sc. und A. Schnürle, B.Eng., welche mich stets tatkräftig unterstützten. Gleiches gilt für alle Mitarbeitenden des IVW, welche stets offen und voller Unterstützung waren, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. (FH) T. Becker, der mich bei den praktischen Versuchen unterstützte.

Nicht zuletzt danke ich meiner Frau und meiner Familie für die unendliche Unterstützung in dieser intensiven Zeit.

- für Sissi -

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Abstract	vi
Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einführung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	3
2.1 Faser-Kunststoff-Verbunde	3
2.2 Hybride Faser-Kunststoff-Verbunde	10
2.3 Oberflächenvorbehandlung	12
2.3.1 Allgemein	12
2.3.2 Niederdruckplasma	13
2.4 Aktueller Forschungsstand	15
2.4.1 Abgrenzung	15
2.4.2 Roboterbasiertes 3D-TowPreg-Faserwickeln	16
2.4.3 Hybride duroplastisch-thermoplastische Strukturen	19
2.4.4 Plasmabehandlung bei Faser-Kunststoff-Verbunden	23
3 Zielsetzung	25
3.1 Forschungshypothesen	25
3.2 Strukturierung der Arbeit	27
4 Roboterbasiertes 3D-TowPreg-Faserwickeln	31
4.1 Einordnung im Gesamtprozess	31
4.2 Wickelanlage	34

4.3	Fadenträger	35
4.4	Wickelkopf	37
4.4.1	Erzeugung der Fadenspannung	38
4.4.2	Wickeln mit variabler Fadenanzahl	40
4.5	Fadenspannungseinfluss	42
4.5.1	In-situ Druckproben-Wickelwerkzeug	44
4.5.2	Charakterisierung des Materials für die Druckversuche	46
4.5.3	Fertigung der Druckprobekörper	47
4.5.4	Versuchsdurchführung	48
4.5.5	Ergebnisse zum Fadenspannungseinfluss	49
4.6	Wickelmuster	51
4.6.1	Bauteileinteilung	52
4.6.2	Generierung von Basis-Wickelmustern	53
4.7	Wickelmuster beim Brakebooster	57
4.7.1	Erzeugung der Soll-Matrix	58
4.7.2	Erzeugung der Muster-Matrix	59
4.7.3	Berechnung der Lösungs-Matrizen	61
4.8	Zwischenfazit	66
5	Hybride duroplastisch-thermoplastische Proben	67
5.1	Hybrides Interface	67
5.2	Auszugsversuch zur Ermittlung der Interface-Festigkeit	70
5.2.1	Materialien für die Auszugsversuche	73
5.2.2	Fertigung der CFK-Einleger	74
5.2.3	Vorbehandlung der CFK-Einleger	75
5.2.4	Umspritzen der CFK-Einleger	76
5.3	Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Interface-Festigkeit	77
5.3.1	Vorversuch v1	78
5.3.2	Vorversuch v2	79
5.3.3	Vorversuch v3	82
5.3.4	Fazit der Vorversuche	84
5.3.5	Hauptversuch v4	85

5.4	Untersuchung der Probekörper	87
5.5	Zwischenfazit	90
6	Anisotropes Strukturbauteil	91
6.1	Beschreibung des Strukturbauteils	91
6.2	Fertigung des Strukturbauteils	92
6.2.1	Ablaufplan der Wickelmuster	92
6.2.2	Roboter-Programmierung des Brakeboosters	93
6.2.3	Wickeln des Brakeboosters	95
6.3	Prüfung des Strukturbauteils	97
6.3.1	Vorversuch	97
6.3.2	Erweiterung des Wickel-Matrix-Codes	99
6.3.3	Hauptversuch	102
6.4	Zwischenfazit	104
7	Hybrides duroplastisch-thermoplastisches Strukturbauteil	105
7.1	Ausgangspunkt	105
7.2	Roboterbasierte Fertigung der Struktur	107
7.2.1	Berechnung der benötigten Basis-Wickelmuster	107
7.2.2	Wickeln des hybriden Brakeboosters	109
7.3	Hybridisierung des Demonstrators	110
7.3.1	Niederdruckplasmabehandlung	110
7.3.2	Umspritzen	111
7.4	Test und Vergleich	113
7.5	Zwischenfazit	114
8	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Schrifttum	119
	Veröffentlichungen/Tagungen	131
	Studentische Arbeiten	133
	Curriculum vitae	135

Kurzfassung

Beste mechanische Eigenschaften werden bei Faser-Kunststoff-Verbunden mit Hilfe von Endlosfaserverstärkungen erreicht. Die Fertigung von komplexen Strukturbauteilen mit Endlosfaserverstärkung ist jedoch ein aufwendiger Prozess, welcher zum Teil immer noch händisch erfolgt. In den bekannten automatisierten Prozessen werden die Endlosfasern für komplexe Bauteile häufig nicht optimal entlang der Lastpfade ausgerichtet und somit nicht effizient eingesetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges Verfahren vorgestellt, welches unter effizienter Ausnutzung der Endlosfasern eine automatisierte Fertigung von hochbelastbaren Strukturbauteilen ermöglicht. Dafür wird das roboterbasierte 3D-Faserwickeln mit vorimprägniertem, epoxidharzbasiertem und endloskohlenstofffaserverstärktem TowPreg, mit dem thermoplastischen, kurzglasfaserverstärkten Spritzgussverfahren kombiniert. Neben den Eigenschaften des zu bewickelnden Fadenträgers und eines eigens entwickelten Wickelkopfes, wird der Einfluss unterschiedlicher Fadenspannungen im Wickelprozess, mit Hilfe der roboterbasierten Fertigung von Druckprobekörpern in einem neuartigen Werkzeug, auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dieser Einfluss konnte nicht nachgewiesen werden. Es wird des Weiteren, anhand eines Demonstrators (Brakebooster), die computerbasierte Erzeugung von Wickelmustern, sowie die Berechnung der optimalen Zusammensetzung dieser, für fachwerkartige Strukturen, entwickelt.

Die Hybridisierung der duroplastischen (Epoxidharz), endlosfaserverstärkten Struktur mit kurzglasfaserverstärktem, thermoplastischem (Polyamid 6) Material wird über unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden der gewickelten Struktur untersucht. Der Fokus wird hier vor allem auf die Behandlung im Niederdruckplasmaverfahren gelegt. Es wird ein Versuch entwickelt, mit dem die gewickelten und hybridisierten Proben im Bereich der Interface-Festigkeit charakterisiert werden können. Bei diesem Versuch konnte eine Interface-Festigkeiten von bis zu $\bar{\tau} = 15,1 \pm 1,1$ MPa durch eine Vorbehandlung mit 45-minütigem Luftplasma nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse werden abschließend an topologieoptimierten Demonstratoren angewendet. Diese werden als Wickelstruktur, in einer plasmabehandelten und nichtvorbehandelten hybriden Variante und einer spritzgegossenen Variante getestet. Die spezifische Steifigkeit der plasmabehandelten, hybriden Brakebooster lag dabei auf dem Niveau der gewickelten Brakebooster und war mehr als doppelt so hoch, wie bei spritzgegossenen Brakeboostern. Auch konnte eine 23 % höher spezifische Steifigkeit durch die Niederdruckplasmabehandlung erreicht werden, als ohne Vorbehandlung.

Abstract

Best mechanical properties of fiber-reinforced composites can be achieved with the help of continuous fiber reinforcements. The manufacturing of complex structural components with continuous fiber reinforcement is an elaborate process. This process is still partially done by manual work. The continuous reinforcements for complex components are often not aligned along the load paths and are therefore not used efficiently in the known automated processes.

A novel process is presented in this work, which enables the automated production of high loadable structural components by efficiently utilizing continuous fibers. The robot-based 3d filament winding process, with pre-impregnated, epoxy resin-based and continuous carbon fiber reinforced TowPreg, is combined with the thermoplastic, short glass fiber reinforced injection molding process.

The properties of the winding tool and the developed winding head are shown. The influence of different fiber forces in the winding process on the mechanical properties is investigated with the help of the robot-based production of compression test specimens with a novel tool. This influence could not be proven. Furthermore, the computer-based generation of winding patterns and the calculation of the optimal composition of these patterns is developed for truss-like structures with the help of a demonstrator (brake-booster).

The hybridization of the thermoset (epoxy resin), continuous fiber reinforced structure with short glass fiber reinforced thermoplastic (polyamide 6) material is investigated by different pretreatment methods of the filament wound structure. The focus is on low-pressure plasma treatment. An experimental setup is developed to characterize the interface region in the overmolded and hybridized samples. An interface strength of up to $\bar{\tau} = 15,1 \pm 1,1$ MPa was verified by pretreating the samples with a 45 minute air plasma.

The results are finally applied to topology optimized demonstrators. These are tested as a filament wound structure, in a plasma pretreated and non-pretreated hybrid version and an injection molded version. The specific stiffness of the plasma pretreated hybrid brakebooster was on the same level as the filament wound brakebooster and was more than twice as high as the injection molded brakebooster. A 23% higher specific stiffness was achieved by the low-pressure plasma pretreatment, compared to non-pretreated demonstrators.

Abkürzungsverzeichnis

α	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient
γ	°	Umlenkungswinkel TowPreg
ε	%	Dehnung
ρ	[g/cm ³]	Wärmeausdehnungskoeffizient
E	N/mm ²	E-Modul
$E_{f }^+$	N/mm ²	E-Modul Faser
L	mm	Länge
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{ }^+$	N/mm ²	Faserparallele Zugfestigkeit
$R_{ }^-$	N/mm ²	Faserparallele Druckfestigkeit
$R_{f }^+$	N/mm ²	Zugfestigkeit Faser
3D		Dreidimensional
Abb.		Abbildung
ABS		Acrylnitril-Butadien-Styrol
BMC		Bulk-Molding-Compound
bzw.		beziehungsweise
CAD		Computer-Aided Design
CFK		Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DGEBA		Diglycidylether von Bisphenol A
DICY		Dicyandiamid

DIC	digitale Bildkorrelation
DP	Duroplast
EP	Epoxidharz
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVG	Faservolumengehalt
Gew.	Gewicht
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GLARE	Glasfaserverstärktes Aluminium
GMT	Glasfasermattenverstärkter Thermoplast
HT	High Tenacity - hochfest
i.d.R.	in der Regel
ILSS	scheinbare interlaminare Scherfestigkeit
kond.	konditioniert
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
MMC	Metal Matrix Composite
NP	nichtdeterministisch polynomielle Zeit
PA	Polyamid
PACM	4,4'-Diaminodicyclohexylmethan
PEEK	Poly-Ether-Ether-Keton
PET	Polyethylenterephthalat
PEI	Polyetherimid
PES	Polyethersulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PC	Polycarbonat
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PS	Polystyrol
PSU	Polysulfon
RTM	Resin Transfer Molding
SMC	Sheet Molding Compound

spez.	spezifisch
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
Tab.	Tabelle
TFP	Tailored Fiber Placement
TGMDA	4,4'-Tetraglycidyl-methylendiamin
TP	Thermoplast
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UD	Unidirektional
UP	Ungesättigtes Polyesterharz
VE	Vinylesterharz
z.B.	zum Beispiel

Kapitel 1

Einführung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden in der heutigen Zeit vielfach als Konstruktionswerkstoff für die Fertigung von Strukturbauteilen eingesetzt. Dies liegt vor allem an den sehr guten spezifischen Eigenschaften und der großen Kombinationsmöglichkeit von verschiedensten Fasern (Art, Länge & Anordnung) und Matrixwerkstoffen. Daraus resultieren unterschiedlichste technische Eigenschaften, wie beispielsweise Festigkeit, Steifigkeit, thermische Leitfähigkeit, et cetera. Die Auswahl des Fertigungsverfahrens für diese FKV richtet sich meist nach der benötigten Stückzahl der Bauteile, den benötigten mechanischen Eigenschaften und nach der geometrischen Komplexität des Bauteils. Dies führt letzten Endes zu einem Zielkonflikt, da nicht immer alle Anforderungen, mit dem gewünschten Fertigungsverfahren, realisiert werden können.

Bauteile, mit hohen Stückzahlen und moderaten technischen Eigenschaften, werden meist bei relativ niedrigen Bauteilkosten im Spritzgussverfahren mit kurz- oder langfaserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen gefertigt. Diese Komponenten können in diesem Verfahren auch einfach funktionalisiert werden. Beispielsweise durch das Anspritzen von Halterungen oder Montageclips.

Bauteile, mit hervorragenden spezifischen Festigkeits- und Steifigkeitswerten, benötigen endlosfaserverstärkte Kunststoffe (die Faserlänge wird lediglich durch die Bauteilabmessungen begrenzt). Diese nutzen häufig, aber nicht ausschließlich, duroplastische Matrixmaterialien. Sie können, je nach Komplexität des Bauteils, nahezu vollständig automatisiert (einfache Geometrien beispielsweise mittels Pultrusion, komplexe Geometrien zum Beispiel im 3D-Wickelverfahren), oder mit einem hohen händischen Anteil, zum Beispiel mittels Prepreg und Autoklav (komplexe Geometrien), gefertigt werden. Es gibt noch viele weitere Fertigungsverfahren, bei denen mit unterschiedlichsten Automatisierungsgraden und Bauteilkomplexitäten, endlosfaserverstärkte FKV gefertigt werden können. Eine Funktionalisierung der Bauteile wie im Spritzgussverfahren, beispielsweise durch hinzufügen von Montage-Clips, ist hier nicht immer einfach realisierbar.

Eine Ausnahme hiervon bildet das sogenannte Organoblech-Umspritzen. Dieses Verfahren nutzt endlosfaserverstärkte, thermoplastische, plattenförmige Halbzeuge (sogenannte Organobleche), welche im Umformprozess umspritzt werden, beispielsweise mit Rippen zur Verstärkung der Struktur (Abb. 1.1 links). Dadurch sind hohe spezifische

Festigkeits- und Steifigkeitswerte bei einer automatisierten Fertigung möglich. Allerdings werden die hohen spezifischen Eigenschaften der Endlosfaserverstärkungen nicht effizient ausgenutzt, da diese bei komplexen Geometrien meist nicht lastpfadspezifisch lokal ausgerichtet werden, sondern häufig global, in mehrere Richtungen orientiert sind.

Ziel dieser Arbeit ist es, Grundlagen für ein neuartiges Fertigungsverfahren zu entwickeln, welches Bauteile mit höchsten spezifischen Steifigkeitswerten, unter effizienter Ausnutzung der Endlosfaserverstärkung, hoher Bauteilkomplexität (inklusive Funktionalisierung) und mit hohem Automatisierungsgrad herstellen kann. Hierfür sollen in einem hybriden Verfahren (siehe Abschnitt 2.4.3) das faserverstärkte, thermoplastische Spritzgussverfahren mit einem duroplastischen, roboterbasierten 3D-Wickelfahren kombiniert werden. Dieses Verfahren soll die Vorteile beider Verfahren (hohe Stückzahl, Funktionalisierung, Automatisierung, höchste spezifische Festigkeits- und Steifigkeitswerte) kombinieren und Nachteile thermoplastischer Einleger (z.B. die meist niedrige Erweichungstemperatur) vermeiden. Dafür werden mit Epoxidharz vorimprägnierte Endloskohlenstofffasern entlang der Hauptlastpfade im 3D-Wickelfahren abgelegt, ausgehärtet und im Niederdruckplasmaverfahren vorbehandelt. Die so entstandenen, meist fachwerkartigen Strukturen, werden anschließend mit kurzglasfaserverstärktem Polyamid 6 umspritzt, um eine Funktionalisierung (z.B. Montageclips, Halterungen, etc.) zu ermöglichen, aber auch um geschlossen flächige Strukturbereiche, sowie eine allgemein hohe Oberflächenqualität zu erzielen (Abbildung 1.1 rechts).

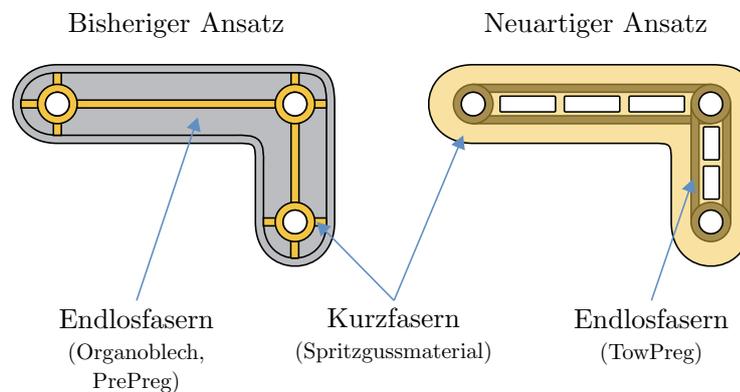


Abb. 1.1: Grundlegender bisheriger Ansatz, mit Umformung und Hinterspritzen (links), sowie neuartiger Ansatz, mit eingebetteten, duroplastischen Endlosfasern (rechts).

Hierfür werden in Kapitel 2 Grundlagen und der aktuelle Stand der Forschung dargelegt und in Kapitel 3 die Strukturierung der Arbeit sowie die Forschungshypothesen detailliert beschrieben. In Kapitel 4 wird genauer auf das roboterbasierte 3D-Wickelfahren mit einer Optimierung von Wickelmustern eingegangen, welches ein Hauptbestandteil für das neuartige hybride Fertigungsverfahren darstellt. Anschließend werden in Kapitel 5 grundlegende Untersuchungen zu hybriden duroplastisch-thermoplastischen Strukturen durchgeführt. In Kapitel 6 und 7 wird das Verfahren an Demonstratoren (Brakebooster) getestet, bevor diese Arbeit in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen wird.

Kapitel 2

Grundlagen und Stand der Forschung

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Fertigungsverfahren von faserverstärkten Kunststoffen beschrieben und eine Lücke in der Fertigungslandschaft gezeigt, welche am Ende, mit Hilfe eines neuen Fertigungskonzeptes, geschlossen werden soll. Es wird auf die hierfür benötigten einzelnen Prozesse eingegangen und die nötigen Schritte zur Hybridisierung dargestellt. Dabei wird eine Abgrenzung zu den aktuell bekannten Verfahren durchgeführt.

2.1 Faser-Kunststoff-Verbunde

Bei Faserverbundwerkstoffen können, durch den Einsatz von Verstärkungsfasern, die technischen Eigenschaften des unverstärkten Ausgangsmaterials stark beeinflusst werden. Dabei werden Fasern in das sogenannte Matrixmaterial eingebettet (Abb. 2.1) und verändern so die Eigenschaften des Ausgangswerkstoffes. Dadurch kann der Faserverbundwerkstoff spezifisch an das Bauteil und die Anforderungen angepasst werden.

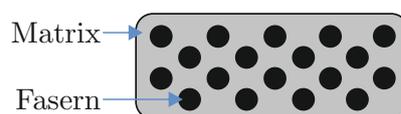


Abb. 2.1: Schematische Darstellung eines Faser-Kunststoff-Verbundes mit Endlosfasern im Querschnitt.

Neben den im Folgenden betrachteten Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV), bei denen ein Polymer als Matrixmaterial eingesetzt wird, gibt es auch noch weitere Verbundwerkstoffe, mit unterschiedlichen Matrixmaterialien, wie etwa Gläser, Keramiken oder Metalle (Abb. 2.2). Beispielsweise ist dies ein Material mit Aluminium-Matrix und

Graphit-Fasern, als Vertreter der Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (MMC) oder kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff (C/C), als Vertreter der keramischen Faserverbundwerkstoffe. Diese Verbundwerkstoffe sind für diese Arbeit nicht relevant und werden deshalb nicht näher beschrieben.

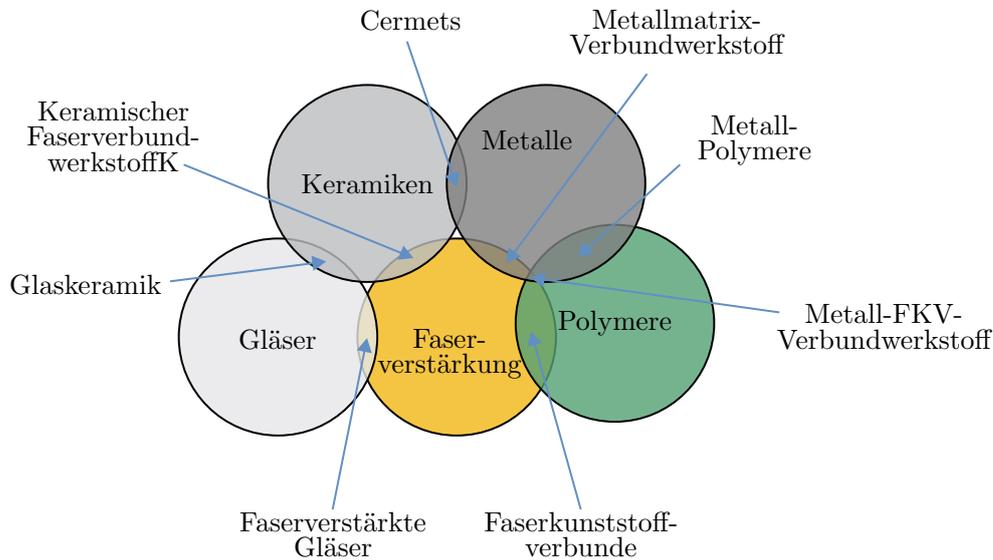


Abb. 2.2: Überblick über unterschiedliche (Faser-)Verbundwerkstoffe nach [1].

FKV Für Faser-Kunststoff-Verbunde ist insbesondere eine Änderung der mechanischen Eigenschaften, gegenüber den Ausgangsmaterialien, zu beobachten. Beispielsweise kann, durch den Einsatz von unidirektionalen Endloskohlenstofffasern in duroplastischen Kunststoffen, die Zugfestigkeit von Epoxidharz, von $R_{m/unverstärkt} = 79 \text{ MPa}$ auf $R_{||}^+ = 2100 \text{ MPa}$, oder mehr gesteigert werden [2]. Auch durch eine Kurzglasfaserverstärkung können die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. Bei thermoplastischen Spritzgussmaterialien kann beispielsweise die Steifigkeit von konditioniertem Polyamid 6, durch Zugabe von 50 Gew.-% Kurzglasfasern, von $E_{unverstärkt} = 1,1 \text{ GPa}$ auf $E_{verstärkt} = 10,2 \text{ GPa}$, erhöht werden [3, 4].

FKV werden meist nach Art (natürlich, organisch, anorganisch oder metallisch) und Länge (kurz, lang, endlos) der Fasern sowie dem Kunststofftyp des Matrixmaterials (Duroplast, Thermoplast, Elastomer) eingeteilt [5]. Elastomere Matrixsysteme werden kaum im Bereich der FKV genutzt und im Weiteren nicht betrachtet.

Fasern Bei den Fasermaterialien kommen meist Glasfasern (Gesamtmarkt über 95 % [6]) oder, vor allem bei höchsten mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen, Kohlenstofffasern zum Einsatz. Beide Faserarten liegen in vielen unterschiedlichen Typen mit unterschiedlichen technischen Eigenschaften vor und können so, je nach Einsatzart, ausgewählt werden. Allgemein lässt sich sagen, dass Glasfasern in der Regel kostengünstiger als Kohlenstofffasern sind und niedrigere Festigkeits- und Steifigkeitswerte, bei einer höheren maximalen Dehnung besitzen. In Tabelle 2.1 ist ein exemplarischer Vergleich von jeweils einer üblichen Glas- (E-Glas) und Kohlenstofffaser (HT) aufgeführt.

Tab. 2.1: Charakteristische, technische Eigenschaften einer beispielhaften Glas- (E-Glas nach [5]) und Kohlenstofffaser (*Toray T700S 12K*) im Vergleich.

	G-Faser	C-Faser
Zugfestigkeit $R_{f }^+$ [MPa]	2400	4900
Steifigkeit $E_{f }^+$ [GPa]	73	230
Dehnung ε [%]	ca. 3,3	2,1
Dichte ρ [g/cm ³]	2,54	1,80

Je nach benötigten Materialeigenschaften des Faser-Kunststoff-Verbundes und des angestrebten Fertigungsprozesses werden Kurz-, Lang- oder Endlosfasern eingesetzt. Höchste mechanische Festigkeits- und Steifigkeitswerte lassen sich hierbei mit einer Endlosfaserverstärkung erreichen. Allerdings ist die Verarbeitung von Endlosfasern schwieriger, da diese biegeschlaff und empfindlich gegenüber mechanischer Beanspruchung sind. Die Einteilung der Länge ist nicht allgemein festgelegt, kann jedoch wie folgt vorgenommen werden [5, 7]:

- Kurzfasern: $0,1 \leq L < 1$ mm
- Langfasern: $1 \leq L < 50$ mm
- Endlosfasern: $L \geq 50$ mm

Matrix Bei duroplastischen Matrixsystemen kommen häufig Vinylester-, ungesättigte Polyester- und Epoxidharzsysteme zum Einsatz. Diese amorphen Kunststoffe bestehen aus hoch vernetzten Molekülketten, welche durch eine Vernetzungsreaktion aus dem jeweiligen Harz und dem dazugehörigem Härter entstehen. Der Vorteil dieser Matrixsysteme liegt vor allem in der niedrigen Viskosität der Ausgangsstoffe, wodurch die Fasern im FKV sehr gut benetzt werden können und somit hohe mechanische Festigkeits- und Steifigkeitswerte im Gesamtverbund möglich sind. Des Weiteren besitzen sie hohe Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Da duroplastische Kunststoffe, aufgrund der räumlichen Vernetzung, nach dem Aushärten nicht wieder schmelzbar sind, können diese Kunststoffe nicht einfach in ihren ursprünglichen Ausgangszustand zurückgeführt werden [5]. Dies wiederum erschwert das Recycling des FKV, welches der Hauptnachteil dieser Kunststoffgruppe ist.

Aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften sowie der weiten Verbreitung, wird in dieser Arbeit für den duroplastischen Hybridpartner ein Epoxidharzsystem verwendet. Epoxidharze können aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen hergestellt werden. Am weitesten verbreitet sind dabei die Epoxidmonomere DGEBA (Diglycidylether von Bisphenol A, Abb. 2.3) und TGMDA (4,4'-Tetraglycidylmethylendiamin), welche mit unterschiedlichen Amin-Härtern, wie etwa DICY (Dicyandiamid, Abb. 2.4) oder PACM (4,4'-Diaminodicyclohexylmethan) reagieren [8]. Epoxidharze können in allen duroplastischen FKV-Fertigungsverfahren genutzt werden. Hauptsächlich jedoch im Bereich der Endlosfaserverstärkungen.

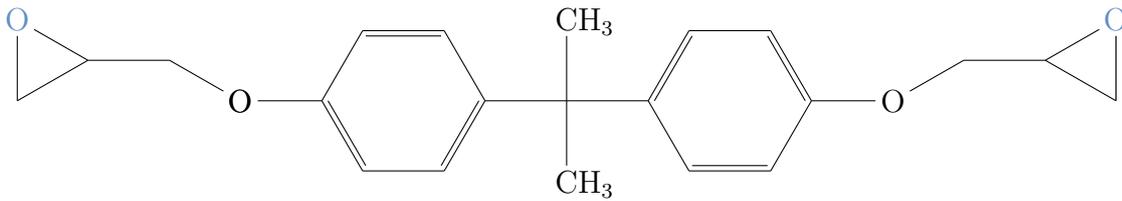


Abb. 2.3: Strukturformel DGEBA mit charakteristischer Epoxy-Gruppe (3-Ringstruktur aus einem Sauerstoff- und zwei Kohlenstoffatomen) an beiden Enden nach [9].

Die charakteristischen Epoxid-Gruppen des Epoxidharzes reagieren, in diesem Beispiel bezogen auf einem aminischen Härter DICY, mit dem Wasserstoffatom der funktionellen Aminogruppe (-NH_2) des Härters. Im Beispiel des DICY (Abb. 2.4) können mit Hilfe eines DICY-Moleküls, vier DGEBA Moleküle vernetzt werden [10]. Dies führt dann in Summe zur gewünschten räumlichen Vernetzung der Epoxidharz-Matrix.

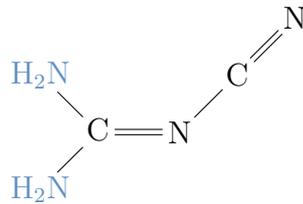


Abb. 2.4: Strukturformel des Amin-Härters DICY mit farblich hervorgehobenen, funktionellen Amino-Gruppen nach [11].

Thermoplastische Kunststoffe können anhand ihrer Struktur in amorphe (z.B. PC, ABS) und teilkristalline (z.B. PA6, PA66, PP) Kunststoffe und anhand der Dauergebrauchstemperatur, in Standard-, Technische- und Hochtemperatur-Kunststoffe, eingeteilt werden (siehe Abbildung 2.5).

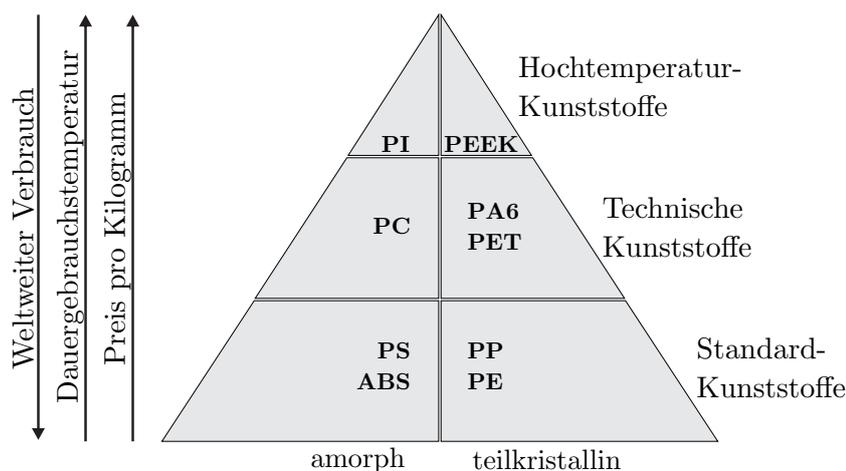


Abb. 2.5: Einteilung thermoplastischer Kunststoffe mit ausgewählten Beispielen nach [9].

Der amorphe Zustand beschreibt dabei eine ungeordnete Struktur der Molekülketten zueinander, wohingegen bei teilkristallinen Kunststoffen, sowohl amorphe, wie auch

periodisch geordnete, kristalline Bereiche vorliegen [9]. Die Einteilung der Gebrauchstemperatur bestimmt im Regelfall den Materialpreis (je höher, desto teurer) und daraus resultierend auch den weltweiten Verbrauch. Bei den thermoplastischen Kunststoffgruppen gibt es eine sehr große Auswahl an unterschiedlichsten Werkstoffen und dazugehörigen Eigenschaften. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf die Verwendung des technischen Thermoplasts Polyamid, genauer PA6, gelegt. Dies liegt vor allem an den guten thermischen und mechanischen Eigenschaften, sowie der weitverbreiteten Verwendung bei Faser-Kunststoff-Verbunden. PA6 und das sehr ähnliche PA66 machen 88 % des Polyamidverbrauchs aus [12]. So werden beide Polyamide, sowohl mit Kurz- und Langfasern im Spritzgussverfahren, wie auch mit Endlosfasern im Tapelegen, im Organoblech-Prozess sowie beim thermoplastischen Wickeln, genutzt.

Bei Polyamid 6 (PA6) handelt es sich um einen teilkristallinen Kunststoff. Dieser entsteht über die Ringöffnung, mittels Wasser, von ϵ -Caprolactam zu einer ϵ -Aminocapronsäure als Zwischenprodukt. Unter Wasserabspaltung kondensiert diese ϵ -Aminocapronsäure dann zu Polyamid 6 [13]. In Abbildung 2.6 ist der Entstehungsprozess bis hin zur ϵ -Aminocapronsäure dargestellt. In Abbildung 2.7 ist die finale Strukturformel von PA6 dargestellt.

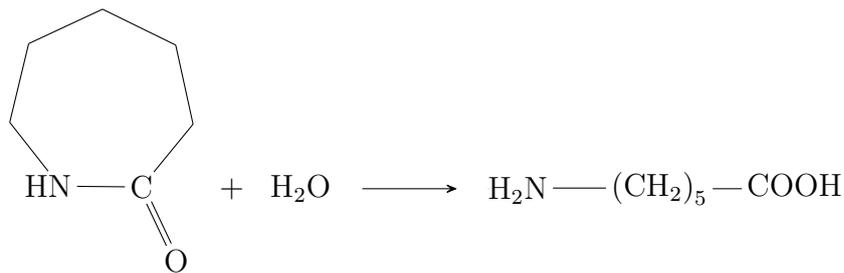


Abb. 2.6: Ringöffnende Polymerisation von ϵ -Caprolactam zu ϵ -Aminocapronsäure [13].

In den Strukturformeln in Abbildung 2.7 und 2.8 ist die charakteristische Amidgruppe (-NH-CO-) der Polyamide hervorgehoben [14]. Die Amidgruppe ermöglicht die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Makromolekülen, was zu einer Erhöhung der Schmelztemperatur und damit zur guten thermischen Beständigkeit führt. Es begünstigt aber auch die Wasseraufnahme des Materials, weshalb PA6-Proben immer auch feuchtigkeits-konditioniert getestet werden müssen [9].

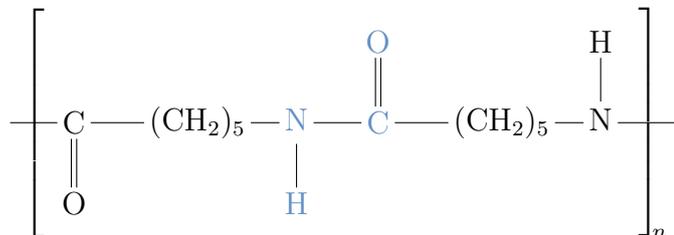


Abb. 2.7: Strukturformel PA6 mit farblich hervorgehobener Amidgruppe

Nicht zu verwechseln ist PA6 mit dem nahezu identischen PA66. Beide Moleküle besitzen in ihrer Summenformel je zwei Amidgruppen bei zehn Methylengruppen ($\text{-CH}_2\text{-}$). Der Unterschied ist in der Strukturformel, lediglich anhand der Anordnung der Amid-

und Methylengruppen im Molekül zu erkennen (Vergleich Abb. 2.7 und 2.8). Die Anordnung ist auch dafür verantwortlich, dass PA66 einen höheren Schmelzpunkt und eine geringere Wasseraufnahme aufweist [12].

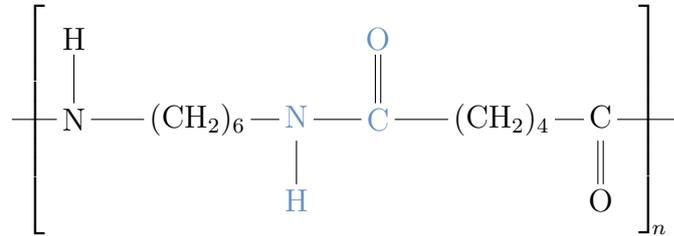


Abb. 2.8: Strukturformel PA66 mit farblich hervorgehobener Amidgruppe

TowPreg Bei TowPreg-Material handelt sich um bereits, mit duroplastischem Matrix-Material, vorimprägnierte Rovings (abgeleitete Bezeichnung von Prepreg; pre-impregnated). Diese können aus allen oben genannten Fasern bestehen, üblich sind allerdings Glas- oder Kohlenstofffasern. Nach dem Imprägnieren der Fasern werden diese auf Rollen aufgewickelt und müssen in der Regel bei $-18\text{ }^\circ\text{C}$ gekühlt werden, damit es zu einer starken Verlangsamung der Reaktion des Harz und Härter in der Matrix kommt. Die Matrix befindet während der Lagerung und Verarbeitung im *B-Stage*. Dieser Zustand wird erreicht, indem eine teilweise Vernetzung des Harz und Härter, nach dem Imprägnieren des Rovings, durch erhöhte Temperatur stattfindet. Diese Temperatur wirkt nur für kurze Zeit, bevor das Material schnell abgekühlt wird und sich somit im lager- und verarbeitungsfähigen *B-Stage* befindet [15,16]. In diesem Zustand weist das Material eine hohe Viskosität auf, was die Handhabung und Verarbeitung vereinfacht. Anschließend kann das Material in einem nachfolgendem Prozess ausgehärtet werden, wobei die Viskosität hier noch einmal abnimmt, bevor das Material letztendlich vollständig aushärtet (Abb. 2.9).

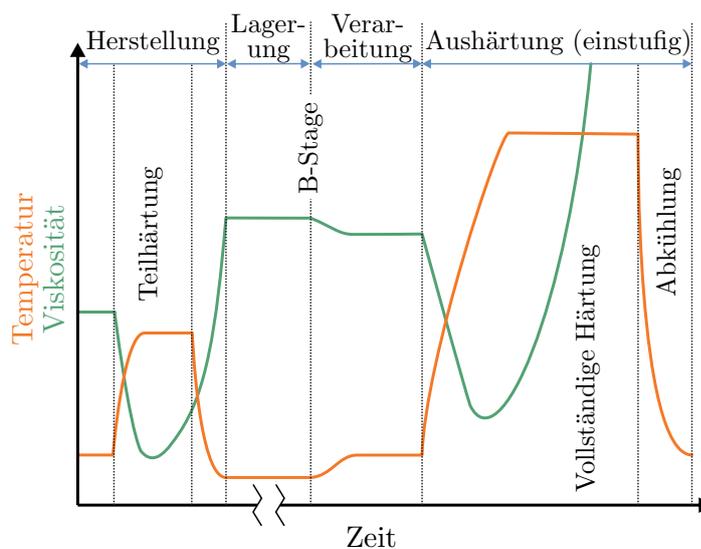


Abb. 2.9: Qualitative Darstellung der Temperatur/Viskosität über die Zeit bei der Fertigung von Bauteilen mit vorimprägnierten, duroplastischen FKV nach [15].

TowPreg ähnelt, sowohl im Herstellungsprozess, wie auch in der Lagerung und den Eigenschaften des Materials, sehr dem weit verbreitetem Prepreg. Statt bahnförmigen Matten werden hier eben nur Rovings imprägniert und verarbeitet (siehe Abb. 2.10). Nicht zu verwechseln ist das Material mit sogenannten *Slit-Tapes* oder *Prepreg-Tapes*, welche durch das schneiden von Prepreg erzeugt werden. Hier liegt das vorimprägnierte Material auch in schmalen Bändern auf Rollen vor, besitzt aber wie das Prepreg auch, eine Trägerfolie unterhalb jeder Bahn.



Abb. 2.10: TowPreg-Rolle.

Fertigungsverfahren Für FKV-Bauteile existieren unterschiedliche Herstellungsprozesse, die abhängig von der Matrixart (duroplastisch oder thermoplastisch) und den Verstärkungsfasern (Länge) sind. In Tabelle 2.2 wird ein Überblick über einige Verfahren, eingeteilt nach Matrixart und Faserlänge, gegeben.

Tab. 2.2: Übersicht FKV-Fertigungsverfahren

Faserlänge	Duroplast	Thermoplast
Kurz	Faserspritzen	Spritzguss
Lang	SMC, BMC	LFT, GMT
Endlos	Prepreg (Heißpressen, Handlaminierten), RTM, Wickeln (klassisch und roboterbasiert), Vakuuminfusion	Organoblech, Tapelegen, Wickeln

Betrachtet man beim Fertigungsprozess, zusätzlich zu den Werkstoffen, noch die erzielbaren mechanischen Eigenschaften, die ungefähren Bauteilkosten, die Automatisierung, sowie die Komplexität der herzustellenden Bauteile, erhält man eine tendenzielle Übersicht der Herstellungsprozesse wie in Abbildung 2.11 dargestellt. So können Bauteile mit einem hohen Grad an Automatisierung und hohen mechanischen Eigenschaften (Pultrusion, klassisches Wickeln), jedoch mit stark eingeschränkter Komplexität gefertigt werden. Eine Ausnahme bildet hierbei das roboterbasierte 3D-Wickelverfahren, welches ebenfalls eine hohe Komplexität der Bauteilgeometrie erlaubt. Aufgrund der benötigten Nachbearbeitung und dem teilweise aufwendigen Aushärten der Bauteile, sinkt allerdings der Grad der Automatisierung. Hingegen ist im Spritzgussverfahren

eine hohe Designfreiheit, bei einem hohen Grad an Automatisierung möglich, jedoch nur bei geringen mechanischen Eigenschaften (aufgrund der begrenzten Faserlänge).

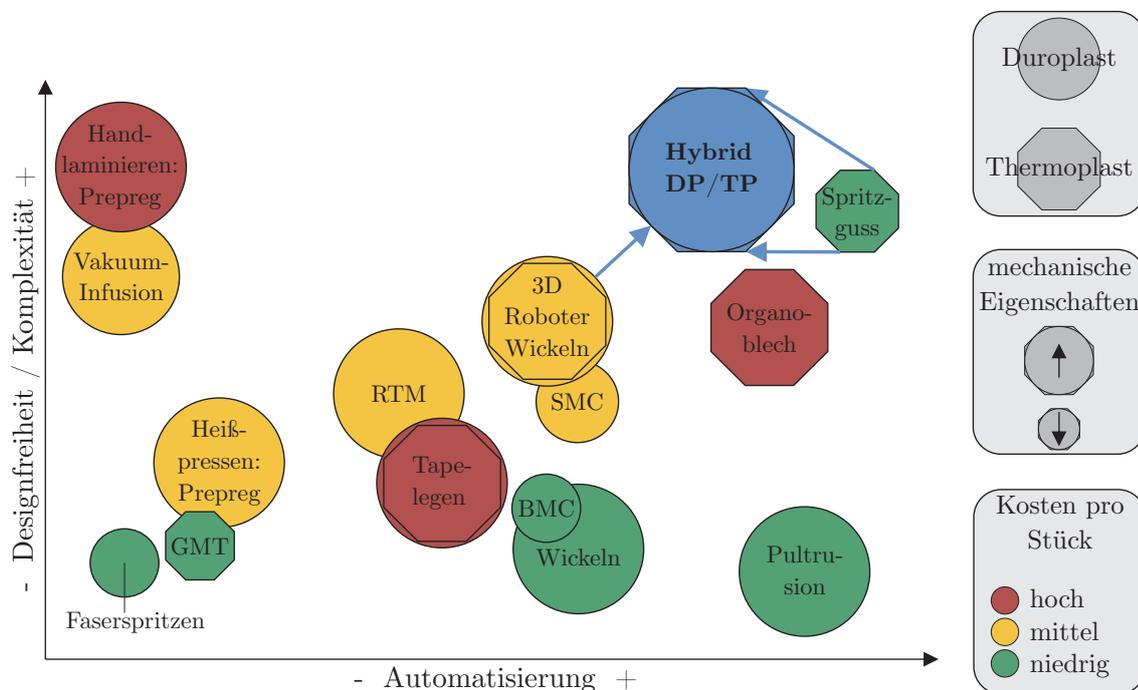


Abb. 2.11: Qualitative, allgemeine Darstellung unterschiedlicher Fertigungsverfahren von FKV mit durchschnittlicher Automatisierung, Komplexität, mechanischen Eigenschaften sowie einer Einteilung in duroplastischen und thermoplastischen Prozess inkl. im allgemeinen erwartbarer Bauteilkosten.

Im Handlaminieren (vor allem mit Prepreg und im Autoklav) lassen sich komplexe Bauteile mit höchsten mechanischen Eigenschaften fertigen, allerdings ohne nennenswerter Automatisierung. Beim Organoblech-Prozess werden, wie bereits erwähnt, hohe mechanische Eigenschaften bei einer relativ hohen Designfreiheit erreicht. Allerdings werden die teuren Endlosfasern hier nicht effizient ausgenutzt, was zu hohen Bauteilkosten führt.

Ziel Hauptziel dieser Arbeit ist es, durch die Kombination des roboterbasierten 3D-TowPreg-Wickeln und des Spritzguss-Verfahrens, ein neues Fertigungsverfahren zu entwickeln, welches die Vorteile beider Verfahren vereint. Es soll ein hoher Grad an Automatisierung, mit höchsten mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitswerten, bei hoher Designfreiheit und Funktionalisierung der Bauteile erreicht werden.

2.2 Hybride Faser-Kunststoff-Verbunde

Ziel von hybriden Materialien oder Strukturen ist es, die Vorteile einzelner Materialien so zu kombinieren, dass ein neues Material oder eine Struktur mit besseren Eigenschaften entsteht, als dies mit den einzelnen Materialien möglich wäre. Abgrenzend dazu

werden Bauteile, die nachträglich aus unterschiedlichen Materialien gefügt werden, hier nicht betrachtet. Die hier untersuchten Materialien werden direkt im Herstellungsprozess auf mikroskopischer oder makroskopischer Ebene erzeugt. Die Definition eines hybriden Materials ist nicht einheitlich und kann unterschiedlich erfolgen [17, 18]. Am geeignetsten für die vorliegende Arbeit ist die Definition nach *Nanko* [18], in der hybride Materialien in folgende drei Kategorien eingeteilt werden:

1. Strukturell hybridisierte Materialien
2. Chemisch hybridisierte Materialien
3. Funktionell hybridisierte Materialien

Strukturell hybridisierte Materialien Die in dieser Arbeit zu erzeugenden hybriden duroplastisch-thermoplastischen Strukturen können der ersten Kategorie zugeordnet werden, welche auf makroskopischer Ebene zusammengesetzt sind. Weitere, bereits etablierte und seit langem bekannte hybride FKV-Materialien der ersten Gruppe, sind im Allgemeinen Metall-FKV-Hybride [19, 20] sowie im Speziellen glasfaserverstärktes Aluminium (GLARE) [21]. Beide werden seit Jahren in der Serienproduktion eingesetzt. Auch wird eine Kombination von kurzfaser- und langfaserverstärkten FKV, unabhängig vom Matrixwerkstoff, als hybrides Material angesehen [22, 23]. Hybride FKV-Strukturen auf Matrix-Ebene, bestehend aus einem duroplastischen oder thermoplastischen FKV und einem Elastomer, können mit Hilfe einer speziellen Elastomerfolie erzeugt werden. Dies kann, je nach Einsatzzweck, im Laminat oder auf dem Laminat zur Verbesserung der Schlagzähigkeit genutzt werden [24].

Im engeren Sinne der strukturell hybridisierten Materialien, müssen auch die bekannten Faser-Kunststoff-Verbunde sowie faserverstärkte Spritzgussmaterialien dieser Kategorie zugeordnet werden. Wie Anfangs bereits erwähnt, ist eine klare Einteilung nicht immer möglich.

Chemisch hybridisierte Materialien Bei chemisch hybridisierten Materialien findet die Hybridisierung hingegen auf atomarer Ebene statt, also nicht im makroskopischen Bereich, wie bei strukturell hybridisierten Materialien der ersten Kategorie.

Funktionell hybridisierte Materialien Bei funktionell hybridisierten Materialien soll eine Kombination zweier oder mehrere Materialien stattfinden, die darin resultiert, dass das neue hybride Material neue Funktionen aufweist [18]. Dies kann beispielsweise durch die Integration von Drähten aus einer Formgedächtnislegierung in FKV erfolgen [25].

Der wichtigste Punkt bei der Untersuchung von strukturell hybridisierten Materialien ist die Verbindung beider Komponenten zueinander. Die Verbindung zweier Werkstoffe oder Bauteile kann über Form-, Kraft- oder Stoffschluss erfolgen. Der Formschluss in dem hier diskutierten hybriden Verfahren wird hauptsächlich durch das Umspritzen und somit dem Umschließen der gewickelten FKV-Struktur durch das thermoplastische Spritzgussmaterial hergestellt. Der Kraftschluss wird durch das Schrumpfen des Spritzgussmaterials beim Abkühlen erzeugt. Die Ausprägung des Kraft- und Formschlusses wird bei den hier vorgestellten Strukturen, durch die Kontur der endlosfaserverstärkten

Struktur bestimmt. Der Stoffschluss wird, an der Grenzfläche beider Komponenten, durch die adhäsiven Eigenschaften des thermoplastischen Spritzgussmaterials generiert [26]. Im Folgenden soll genauer auf die hier wirkenden adhäsiven Eigenschaften, auf Grundlage von Klebeverbindungen, eingegangen werden. Diese wirken, wie bereits erwähnt, unabhängig von der Geometrie der Struktur.

Bei der adhäsiven Verbindung unterscheidet man nach *Habenicht* [27] zwischen den folgenden drei Wirkmechanismen, die zur Anhaftung des Klebstoffes, oder hier des thermoplastischen Spritzgussmaterials, beitragen:

1. Spezifische Adhäsion
2. Mechanische Adhäsion
3. Autohäsion

Spezifische Adhäsion Die spezifische Adhäsion beschreibt die auf chemischen, physikalischen und thermodynamischen Gesetzen basierenden Adhäsionseffekte und tritt im Bereich von ca. 0,2-1 nm auf [27]. Hierbei wirken vor allem atomare und zwischenmolekulare Wechselwirkungen (Nebervalenzkräfte polarer Gruppen), welche sich allerdings nur bei einer guten Benetzung, und somit einer Annäherung der Moleküle beider Werkstoffe bis in den zwischenmolekularen Bereich, ausbilden [28]. Vor allem Werkstoffe mit hoher Oberflächenenergie weisen diese gute Benetzbarkeit auf.

Mechanische Adhäsion Bei der mechanischen Adhäsion wirkt vor allem der Mikroformschluss, bei dem durch Hinterschneidungen eine Kraftübertragung möglich wird [27]. Dieser spielt insbesondere bei der Kombination von artfremden Werkstoffen, wie etwa dem Umspritzen von Metalleinlegern, eine relevante Rolle [29]. Wichtig hierbei ist vor allem die Temperatur des zu umspritzenden Einlegers, da die Spritzgussmasse nicht sofort am kalten Einleger erstarren soll, sondern in die erzeugten Mikrostrukturen hineinfließen muss [30].

Autohäsion Auf die Autohäsion, eine Art Kohäsionskraft die unter Anwendung von Druck gebildet wird, soll hier nicht weiter eingegangen werden, da diese fast ausschließlich bei kautschukelastischen Polymerschichten eine Rolle spielt [27].

2.3 Oberflächenvorbehandlung

2.3.1 Allgemein

Mit Hilfe von Vorbehandlungsmethoden soll eine bessere Anbindung zwischen zwei Werkstoffen realisiert werden. Insbesondere dann, wenn beide Werkstoffe nicht identisch sind, spielen die Vorbehandlungsmethoden eine wichtige Rolle. Je nach Art der Vorbehandlung ist das Resultat unterschiedlich. Prinzipiell kann bei den Vorbehandlungsmethoden in mechanische, physikalische oder chemische Methoden unterschieden werden. In der folgenden Übersicht sind zu den jeweiligen Methoden einige Beispiele, in Anlehnung an *Habenicht* [27], aufgeführt.

- Mechanisch: Bürsten, Schleifen, Strahlen
- Physikalisch: Corona-Verfahren, Plasma, Laser, Beflammen
- Chemisch: Beizen, Primer

Mechanische Vorbehandlung Bei mechanischen Vorbehandlungen soll die Oberflächenstruktur durch Anrauen vergrößert werden. Dadurch entsteht zum einen eine größere Verbindungsfläche und zum anderen Mikroverzahnungen, welche teilweise durch Hinterschnitte ein Ineinandergreifen der Fügepartner ermöglichen soll. Die Fügepartner sollten allerdings vor der mechanischen Vorbehandlung immer gereinigt, insbesondere entfettet, werden.

Physikalische Vorbehandlung Bei physikalischen Vorbehandlungsmethoden soll die Oberfläche, durch Einbringen von (meist) Sauerstoffatomen, chemisch verändert werden. Dadurch entsteht eine bessere Benetzbarkeit und gleichzeitig wird die Ausbildung von zusätzlichen Haftungskräften ermöglicht [27]. Des Weiteren kann die Oberfläche bei den physikalischen Prozessen im gleichen Schritt gereinigt, entfettet und vorbehandelt werden.

Chemische Vorbehandlung Beim Beizen soll durch die Verwendung von (meist) Säuren und Laugen die Oberfläche angeätzt werden, was in der Kunststofftechnik eine eher untergeordnete Rolle spielt und daher nicht weiter betrachtet wird [28]. Als weitere chemische Vorbehandlungsmethode kann auch der Einsatz von Primern gezählt werden, welche teilweise aber der Oberflächennachbehandlung zugeordnet werden [27]. Diese kommen vor allem bei Klebungen zum Einsatz und sollen die Adhäsion zwischen Klebstoff und Werkstoff verbessern sowie die Langzeitbeständigkeit erhöhen [28].

Da die in dieser Arbeit gewickelten CFK-Strukturen mit Hilfe des Niederdruckplasmas vorbehandelt werden, einer etablierten physikalischen Vorbehandlungsmethode, soll dieses Verfahren im Folgenden detaillierter beschrieben werden. Hier werden auch die Gründe ersichtlich, warum dieses Verfahren genutzt werden soll.

2.3.2 Niederdruckplasma

Plasma bezeichnet einen Aggregatzustand, bei welchem ein Gasgemisch aus negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Ionen, sowie einzelnen Atomen und Molekülen vorliegt [31]. Beim Niederdruckplasma wird dieser Zustand in einem Rezipient (Vakuumkammer), bei Drücken von $p < 1$ mbar [32], mittels zweier Elektroden und einer hochfrequenten Spannung erzeugt (Abbildung 2.12). Die üblichen Frequenzen der Spannung sind 40 oder 100 kHz, 13,56 MHz oder 2,45 GHz. Die an dem Hochfrequenzgenerator (Kilo- und Megahertz Bereich) angeschlossene Elektrode dient als Kathode, der Rezipient als Anode. Es können auch Generatoren mit 2,45 GHz Frequenzen genutzt werden, wobei sich hier der Aufbau der Anlage etwas unterscheidet. Im vorhandenen Prozessgas in der Plasmakammer entstehen durch den niedrigen Druck und die Energiezufuhr der hochfrequenten Spannung, neben den weiterhin vorhandenen neutralen Atomen und Molekülen, positiv geladene Teilchen (Ionen, Radikale) durch das Herauslösen von negativ geladenen Teilchen (Elektronen) [33]. Je nach verwendetem

Prozessgas, unterscheiden sich die erzeugten chemischen Spezies im Plasmagas. Das so entstandene Plasma kann nun, je nach Dauer des Prozesses, zum Reinigen, Aktivieren und Ätzen von Bauteiloberflächen genutzt werden. Befindet sich das Bauteil auf einem Bauteilträger im Rezipient, findet ein isotroper Ätzvorgang statt. Wird das Bauteil hingegen direkt auf die Kathode gelegt, kommt es zu einem anisotropen Ätzprozess, dem RIE (Reactive Ion Etching) [34]. Des Weiteren können mittels Plasma auch Beschichtungen aufgebracht werden. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte bei der Niederdruckplasmabehandlung genauer beschrieben.

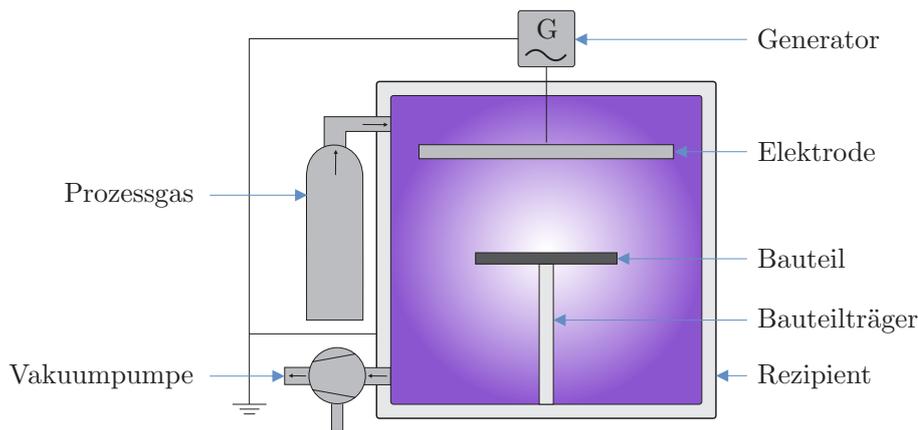


Abb. 2.12: Skizze einer Niederdruckplasmaanlage.

Reinigen Das Reinigen der Oberfläche kann sowohl chemisch, als auch physikalisch erfolgen, abhängig vom verwendetem Gas [32]. Beim physikalischen Reinigungsprozess werden die Verunreinigungen durch die beschleunigten Ionen von der Oberfläche herausgelöst, ohne dass eine chemische Reaktion entsteht, was z.B. bei der Verwendung von Argon als Plasmagas der Fall ist. Beim chemischen Reinigen reagieren die Ionen zusätzlich mit den Verunreinigungen und können so von der Oberfläche losgelöst werden. In beiden Fällen werden die Verunreinigungen durch die kontinuierliche Vakuumerzeugung abgesaugt. Bei Kunststoffen findet die Reinigung in der Regel immer gleichzeitig mit dem Aktivieren der Oberfläche statt [34].

Aktivieren Beim Aktivieren von Werkstoffen, insbesondere Kunststoffen, kann zwischen einem Aktivieren mittels Edelgas (z.B. Argon) oder mittels eines reaktiven Gases (z.B. Sauerstoff) unterschieden werden. Bei der Nutzung von Edelgasen werden chemische Verbindungen auf der zu aktivierenden Oberfläche aufgetrennt. Ein Beispiel hierfür ist das Abspalten von H^+ -Ionen von C-H-Bindungen bei Polymeren oder das Auftrennen von C-C-Bindungen an Kohlenstofffasern. Dadurch bleiben auf der Oberfläche reaktionsfreudige Radikale zurück [35]. Bei der Nutzung von reaktiven Gasen können, zusätzlich zu diesem Prozess und abhängig vom verwendeten Gas, funktionelle Gruppen auf die Oberfläche aufgebracht werden [34]. Bei der Verwendung von Sauerstoff oder Luft als Plasmagas, können dies beispielsweise Hydroxy-Gruppen (OH-Gruppen) sein [35, 36].

Ätzen Je nach verwendetem Gas, wird bei langen Prozesszeiten (i.d.R. > 15 min) die Oberfläche nicht nur gereinigt und aktiviert, sondern auch angeätzt [34]. Dabei wer-

den Teile der Oberflächenstruktur herausgelöst. Somit entsteht eine raue Oberfläche, ähnlich wie beim mechanischen Aufräuen von Oberflächen. Je nach Zusammensetzung der zu ätzenden Oberfläche, wird diese unterschiedlich stark angegriffen.

Beschichten Niederdruckplasma kann auch für die Beschichtung von Bauteilen genutzt werden. Hierfür werden zusätzlich zum Prozessgas Monomere eingebracht, welche durch das Plasma polymerisieren und anschließend eine etwa ein Mikrometer dicke Schicht, auf der Bauteiloberfläche bilden [34].

2.4 Aktueller Forschungsstand

2.4.1 Abgrenzung

Zu Beginn des Abschnittes wird eine Abgrenzung zum Umspritzen von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Einlegern und dem Anspritzen von sogenannten Organoblechen (endlosfaserverstärktes Plattenhalbzeug mit thermoplastischer Matrix) vorgenommen. Diese beiden Verfahren sind dem hier vorgestellten Prozess am ähnlichsten. Im Folgenden soll erläutert werden, warum nicht einer dieser bereits bekannten Prozesse, für die Herstellung von hochbelastbaren, lastpfadoptimierten Bauteilen mit großer Geometriefreiheit, genutzt wird.

Bei beiden Prozessen wird das Problem der artfremden polymeren Werkstoffe (duroplastisch und thermoplastisch) und damit das Anbindungsproblem des Spritzgusswerkstoffes an den Einleger / das Organoblech umgangen. Dabei können Werkstoffe mit identischer thermoplastischer Matrix, aber auch eine Kombination aus unterschiedlichen thermoplastischen Matrixwerkstoffen, genutzt werden [22, 37–39]. Lässt man nun die thermoplastischen Hochleistungswerkstoffe (z.B. PEEK, PPS) außen vor, da diese nur eine Nischenlösung für sehr hochpreisige Bauteile in der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrt darstellen, tritt die erste Problematik im Spritzgussprozess selbst auf. Aufgrund der im Regelfall niedrigeren Glasübergangstemperatur von technischen thermoplastischen (z.B. PA6, PC, PET) zu duroplastischen (z.B. EP, UP, VE) Werkstoffen, kommt es frühzeitiger, unter dem Druck und der Temperatur beim Spritzgussprozess, zu einer Verformung der Einleger/Organobleche. Dies kann vor allem dann problematisch werden, wenn filigrane, lastpfadoptimierte thermoplastische Einleger genutzt werden [40, 41]. Diese Nachteile treten ebenso bei Strukturen auf, die im thermoplastischen Wickelverfahren erzeugt werden (siehe Abschnitt 2.4.2). Dieses Problem wird mit duroplastischen Einlegern umgangen.

Zusätzlich handelt es sich bei Organoblechen, wie der Name bereits suggeriert, um plattenartige Halbzeuge. Somit findet hier, im Gegensatz zum roboterbasierten 3D-Faserwickeln, kein gezielter und lastpfadoptimierter Einsatz der Endlosfasern statt. Häufig wird hier, aufgrund des Umformprozesses der Platten, auch ein bi- oder multi-axialer Lagenaufbau, eingesetzt. Somit können die Festigkeits- und Steifigkeitswerte der Endlosfaserverstärkungen nicht effizient genutzt werden.

Des Weiteren ist es das Ziel, höchste Festigkeits- und Steifigkeitswerte im Bereich der endlosfaserverstärkten Strukturen einzusetzen. Hierbei sind im allgemeinen end-

losfaserverstärkte duroplastische Materialien (z.B. TowPreg oder Prepreg), ihrem thermoplastischen Pendant (UD-Tape, Organoblech), aufgrund der höheren Festigkeits- und Steifigkeitswerte der duroplastischen Matrix und der besseren Benetzbarkeit der Fasern, überlegen. Ausnahmen hiervon können lediglich mit sehr hochpreisigen Hochtemperatur-Kunststoffen, wie beispielsweise PEEK, erreicht werden.

Eine weitere Alternative zum hier verwendeten, roboterbasierten 3D-Wickelfahren, wäre das Tapelege-Verfahren. Hier werden undirektionale, vorimprägnierte, duroplastische Tapes, automatisiert abgelegt. Dies kann gezielt entlang vordefinierter Lastpfade erfolgen. Allerdings weist dieses Verfahren eine erhebliche Einschränkung der Designfreiheit auf, da vorrangig ebene, oder leicht gekrümmte Flächen, hergestellt werden. Auch könnte anstelle des Wickelfahrens das Tailored Fiber Placement genutzt werden. Hier werden Endlosfasern entlang der Lastpfade in einem Stickprozess auf ein Trägergewebe aufgebracht um ein Preform zu erzeugen. Dieses Preform wird anschließend in einem nachgelagerten Prozess mit dem Matrix-Material infiltriert und umgeformt. Es können hiermit auch dreidimensionale Bauteile erzeugt werden, allerdings ist die Einschränkung, auf Grund des Umformprozesses, weit aus höher, als im roboterbasierten 3D-Wickelfahren.

Aus diesen genannten Gründen soll im Folgenden das roboterbasierte 3D-TowPreg-Faserwickeln genauer beschrieben werden.

2.4.2 Roboterbasiertes 3D-TowPreg-Faserwickeln

Das Wickelfahren ist ein, seit den 1940er Jahren, bekannter und damit seit langem genutzter Fertigungsprozess für endlosfaserverstärkte Bauteile [42, 43]. Das Herstellungsverfahren, im Folgenden *klassisches Wickelfahren* genannt, wird vorwiegend für rotationssymmetrische Bauteile, wie etwa Rohre oder Drucktanks, genutzt. In seiner einfachsten Konfiguration werden lediglich zwei angetriebene Achsen zur Herstellung von Bauteilen benötigt. Eine Achse für die Rotation des Kerns und eine zweite Achse für die lineare Verschiebung des Fadenauges (das Fadenauge ist der Auslasspunkt des Materials aus der Anlage, siehe Abbildung 2.13) [44].

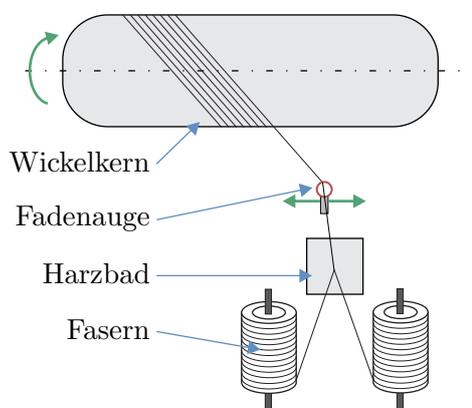


Abb. 2.13: Schematischer Aufbau einer vereinfachten, zweiachsigen Wickelanlage für rotationssymmetrische Bauteile.

Aktuell werden vier Achsen im klassischen Wickelverfahren als angemessen angesehen. Diese sind für die Rotation des Kerns und des Fadenauges sowie der Verschiebung des Fadenauges parallel zum Kern und senkrecht auf den Kern, zuständig. Mehr Achsen sind möglich, oft aber nicht nötig, da das System mit jeder Achse komplexer wird [45]. Hiermit kann der Roving dann in Bereichen von ca. 5° - 80° in Form von Umfangs-, Kreuz- und Polarwicklungen abgelegt werden [46]. Eine weiter Entwicklung im Bereich des klassischen Wickelns, die sog. Ringwickeltechnologie, ermöglicht es, bis zu 48 Rovings gleichzeitig radial abzulegen [47].

Als Weiterentwicklung zum klassischen Wickelverfahren wird im hier vorgestellten Fertigungsverfahren das 3-dimensionale, roboterbasierte Faserwickeln mit TowPreg eingesetzt. Durch den Einsatz von mehrachsigen Industrie-Robotern zum Wickeln von FKV-Bauteilen, kann von einfachen, rotationssymmetrischen Geometrien abgewichen werden und es können komplexere Bauteile gefertigt werden [48]. Des Weiteren kann durch den Einsatz von Industrierobotern der Grad der Automatisierung erhöht werden [49]. Der Aufbau einer solchen Anlage geschieht in der Regel mit 6-Achs-Robotern als Basis und kann grundlegend in vier Konzepte eingeteilt werden, die nachfolgend in Abbildung 2.14 dargestellt sind [50].

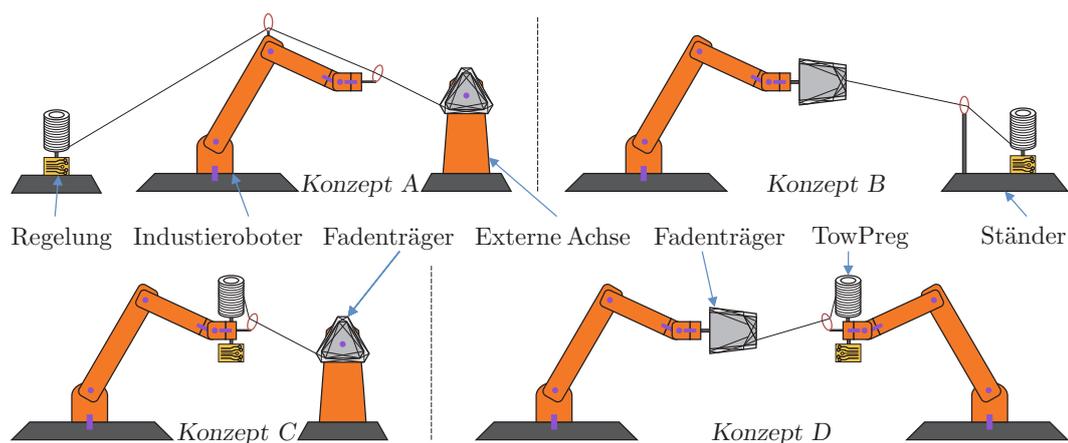


Abb. 2.14: Übersicht über die grundlegenden Konzepte für das roboterbasierte 3D-Faserwickeln nach *Bauer et al.* [51].

Im Folgenden wird noch einmal genauer auf die beiden wichtigsten Bestandteile des roboterbasierten 3D-Faserwickelns eingegangen.

Fadenspannung Einer der wichtigsten Parameter beim Wickeln ist die Fadenspannung, deren Erzeugung durch die Regelung in Abbildung 2.14 dargestellt ist. Diese sorgt dafür, dass der Roving beim Wickeln nicht durchhängt, vor allem beim Annähern des Wickelkopfes an den Fadenträger, und somit ungenau abgelegt wird [52–56]. Des Weiteren kann mit der Fadenspannung das Kompaktieren des Laminats bereits während des Wickels beeinflusst werden. Beim Wickeln mit einer In-situ Imprägnierung, beeinflusst die Fadenspannung auch den Faservolumengehalt im Laminat [57]. Die Fadenspannung kann dabei aktiv durch das Auf- und Abspulen des Rovings, z.B. mittels E-Motor [51], oder passiv ohne das Aufspulen des Fadens, z.B. mittels Magnetpulverbremse [58], rea-

lisiert werden. Die Erzeugung der Fadenspannung kann extern (Konzept A und B) [48] oder am Roboter selbst (Konzept C und D) [59, 60] erfolgen.

Fadenträger Der Fadenträger gibt die Geometrie des zu erzeugenden Bauteils vor. Der Fadenträger kann dabei extern, ohne zusätzliche Achse befestigt werden [61], auf einer zusätzlichen externen Achse gelagert werden (Konzept A und C) [62] oder direkt am Roboter befestigt werden (Konzept B und D) [48]. Dabei kann der Fadenträger als Kern im späteren Bauteil verbleiben [63] oder das Bauteil wird vom Fadenträger nach dem Aushärten getrennt und ohne Kern genutzt [62].

In Tabelle 2.3 werden die Konzepte aus Abbildung 2.14 bezüglich ihrer wichtigsten Eigenschaften noch einmal gegenübergestellt und bewertet. Dabei werden die nachfolgenden Kriterien betrachtet.

Tab. 2.3: Bewertung der roboterbasierten Anlagenkonzepte nach *Bauer et al.* [51].

Konzept	Code	Material	Geschwindigkeit	Kinematik	Parallelisierung	Größe	Invest
A	o	+	-	o	+	o	+
B	+	+	o	-	-	+	+
C	o	o	o	o	+	+	o
D	-	o	+	+	-	-	-

+ positiv o neutral - negativ

Code Im Abschnitt Code wird der Programmieraufwand für die einzelnen Konzepte abgeschätzt. Je mehr bewegliche Achsen die Anlage aufweist, desto höher ist der Programmieraufwand und desto schlechter fällt die Bewertung aus.

Material Hier wird bewertet, wie viel Wickel-Material an der Anlage bereitgehalten werden kann. Insbesondere bei großen Bauteilen ist dies ein wichtiger Punkt, da der Materialwechsel die Fertigungszeit beeinflusst. Bei einer externen Lagerung des Materials (nicht direkt am Roboter) ist dies nahezu unbegrenzt möglich.

Geschwindigkeit Die Geschwindigkeit beschreibt die Menge an Material, die pro Zeit abgelegt werden kann. Befindet sich das Material dabei weit weg vom Ablagepunkt, kann dies zu einem Aufschwingen des freien, nicht geführten Materials bei hohen Geschwindigkeiten führen. Kann hingegen die freie Materiallänge sehr kurz gehalten werden und zusätzlich zwei Industrieroboter für die Materialablage und Fadenträgerführung genutzt werden, können maximale Ablegegeschwindigkeiten in diesem Prozess erreicht werden.

Kinematik Die Kinematik berücksichtigt die möglichen vorhandenen Freiheitsgrade der Anlage und verhält sich bei der Bewertung entgegengesetzt zum Programmieraufwand. Je mehr kinematische Freiheiten vorhanden sind, desto komplexere Bauteile können gefertigt werden.

Parallelisierung Beim Sperren von gewissen Freiheitsgraden des Industrieroboters, meist die Rotation um zwei Achsen des Roboterflansch-Koordinatensystems, kann bei bestimmten Anlagenkonzepten eine Parallelisierung der Bauteilfertigung erreicht werden [64]. Dabei können mit Hilfe eines Industrieroboters mehrere identische Bauteile gleichzeitig gefertigt werden.

Größe Dieser Bereich beschreibt die benötigte Grundfläche der Anlagenkonzepte. Je kleiner die benötigte Grundfläche, desto besser ist die Bewertung.

Invest Die Anschaffungskosten des Anlagenkonzeptes spielen eine essenzielle Rolle für die späteren Bauteilkosten. Dabei gilt vereinfacht: Je mehr Achsen benötigt werden und vorhanden sind, desto höher sind die Anschaffungskosten. Hierbei wird auch berücksichtigt, dass bei Konzept A, aufgrund der externen Lagerung der Fadenspannungseinheit, ein Industrieroboter mit geringerer Traglast genutzt werden kann, da dieser nur das Material führen muss.

Im klassischen wie auch roboterbasierten Wickelverfahren können sowohl duroplastische, wie auch thermoplastische Kunststoffe eingesetzt werden. Dabei kommen beim duroplastischen Wickeln entweder trockene Fasern zum Einsatz, bei denen das Bauteil nach dem Preforming imprägniert wird [46, 65], oder es findet eine In-situ Imprägnierung der trockenen Fasern im Prozess statt [66–69]. Alternativ kann auch mit bereits vorimprägnierten Fasern, in Form von TowPreg [50, 70] oder Tape [71, 72], gewickelt werden.

Beim Wickeln mit einem Matrix-Material auf thermoplastischer Basis können unterschiedliche Ausgangsformen des Materials genutzt werden [73]. Beispielsweise können bereits vollständig imprägnierte Fasern in Form von Tapes [74] genutzt werden. Aber auch pulverimprägnierte Rovings [75], oder sogenannte *commingled yarns* (Endlosfaserverstärkungen werden zusammen mit thermoplastischen Fasern, welche als Matrixmaterial dienen, in einem Roving vereint) [76–78] können zum Wickeln genutzt werden. Alternativ ist es auch möglich, die Endlosfasern im Wickelprozess mit einer thermoplastischen Matrix zu imprägnieren [79, 80]. Allerdings ist dieses Verfahren nicht weit verbreitet. Des Weiteren können auch bereits konsolidierte FKV-Stäbe als Ausgangsmaterial genutzt werden, welche vor dem Wickeln aufgeheizt und somit verformbar und damit wickelbar werden [41].

Abschließend sollen in der Tabelle 2.4 noch einmal einige Vor- und Nachteile des roboterbasierten 3D-TowPreg-Wickelns übersichtlich dargestellt werden [48, 49, 63, 64]. Diese werden nicht mit einem bestimmten FKV-Verfahren verglichen, sondern stellen diese allgemein dar.

2.4.3 Hybride duroplastisch-thermoplastische Strukturen

Hybride duroplastisch-thermoplastische Strukturen (DP-TP Strukturen) wurden bisher kaum untersucht. Erst in den letzten Jahren fanden hier weitergehende Betrachtungen statt [81–87]. Eine Ausnahme hiervon ist das Fügen von DP-TP Strukturen, beispielsweise durch lokales Aufschmelzen des TP zum Erzeugen eines Formschlusses,

Tab. 2.4: Allgemeine Vor- und Nachteile des roboterbasierten 3D-TowPreg-Wickeln.

Vorteile	Nachteile
lastpfadgerechte Nutzung von Endlosfasern	Aufwendige Programmierung des Roboters
hohe spezifische mechanische Bauteileigenschaften durch ein hohes Maß an Faserorientierung	relativ schlechte Oberflächenqualität
hohe Bauteilkomplexität möglich kaum Materialverschnitt	teures Ausgangsmaterial (TowPreg)
relativ niedriges Anlageninvest	
automatisierte Fertigung	

welches seit längerem bekannt ist [88]. Um die Übersicht über die bereits bekannten DP-TP Strukturen zu erleichtern, werden diese in unterschiedliche Bereiche eingeteilt. In Anlehnung an *Schares* [89] kann dies für stoffschlüssig verbundene hybride Strukturen, anhand des Aushärtzustandes der duroplastischen Komponente, wie folgt geschehen. Strukturen, welche mit einem Klebstoff im Nachhinein verbunden werden, werden dabei in dieser Arbeit nicht betrachtet.

- Unausgehärteter DP
- Teilausgehärteter DP
- Vollständig ausgehärter DP

Unausgehärteter DP Bei den unausgehärteten duroplastischen Strukturen wird das duroplastische Material nach dem Aufbringen auf die TP-Komponente ausgehärtert. Es kann entweder ein Prepreg Material ausgehärtert werden, während es sich mit der TP-Struktur in Kontakt befindet, oder aber die DP-Struktur kann nur mit einer dünnen TP-Funktionsschicht ausgehärtert werden. Die Funktionsschicht befindet sich dabei entweder zwischen mehreren DP-Lagen, dann wäre die DP-TP Hybridstruktur bereits vollständig, oder am äußersten Rand. Befindet sich die TP-Lage an der Außenseite, kann das bereits hybridisierte Bauteil zusätzlich umspritzt werden, oder die Funktionsschicht kann zum Fügen von duroplastischen Bauteilen, beispielsweise durch das Ultraschallschweißen [90], genutzt werden. Damit es zu einer Verbindung der beiden Materialien kommen kann, sollten chemische Komponenten der nicht-ausgehärteten DP-Matrix, mit den Molekülen der TP-Folie/Struktur, chemisch reagieren können. Dies ist vor allem bei einigen amorphen thermoplastischen Materialien wie PEI, PSU und PES, in Kombination mit einem Epoxidharz, möglich [81]. Aber auch die Amin-Gruppen des PA6 können, abhängig vom DGEBA im Epoxid, teilweise an Stelle der normalerweise verwendeten Amin-Härter, mit dem Epoxidharz reagieren [91].

Rawa et al. [92] untersuchten eine plattenartige, endlosfaserverstärkte Epoxid-Struktur,

die mit Verstärkungsrippen und Kabelführungen aus PP, PA12 und TPU umspritzt werden soll. Dabei wird beim Aushärten der endlosfaserverstärkten Struktur eine Koppelschicht eingebracht. Diese Koppelschicht ermöglicht im Anschluss die stoffschlüssige Anbindung des Spritzgussmaterials.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgten *Shi et al.* [93] mit dem Ziel, endlosfaserverstärkte Epoxid-Strukturen mittels Schweißen zu fügen. Dafür wurde ein PEEK-Film mit UV-Strahlung vorbehandelt und gemeinsam mit der FKV-Struktur ausgehärtet. Somit soll es im Nachhinein möglich sein, eine thermoplastische Schweißverbindung auf Basis des PEEK-Materials zu erzeugen. Es konnte nachgewiesen werden, dass durch eine zeitlich begrenzte UV-Behandlung des PEEK-Films, eine belastbare Anbindung zum FKV möglich ist (kohäsives Versagen wurde ermittelt).

Marino et al. [94] platzierten TP-Schichten (ABS und PS) im Inneren eines DP-Prepreg Laminates, um das Schädigungsverhalten hinsichtlich Delamination zu beeinflussen. Dabei wurden die TP-Schichten teilweise auch mit Sauerstoffplasma vorbehandelt, um eine bessere Anbindung an das noch nicht ausgehärtete Prepreg zu ermöglichen. Die Anbindung der PS-Schicht konnte durch die Plasmabehandlung signifikant verbessert werden und das Versagensverhalten konnte bei beiden TP-Materialien durch die Plasmabehandlung geändert werden.

Rasmussen et al. [95] beschreiben in ihrem Patent ein hybrides Verfahren, bei dem ein Prepreg vor dem Aushärten an eine TP-Struktur aus PEI oder PES laminiert wird. Während des Aushärteprozesses des Prepregs, unter Temperatur und Druck, bildet sich dann eine Verbindung zwischen den beiden Materialien. Dabei darf beim Aushärten der DP-Struktur, die Glasübergangstemperatur des TP-Materials, nicht signifikant überschritten werden.

Teilausgehärteter DP Bei hybriden Strukturen, welche mit teilausgehärteten DP-Strukturen erzeugt werden, findet eine Vorvernetzung des Matrix-Materials statt, bei der es jedoch nicht zu einer kompletten Aushärtung des Materials kommt. Hierbei kann es zu chemischen Verbindungen zwischen DP und TP kommen, wie schon bei den nicht ausgehärteten DP-Varianten.

Kazan [96] untersuchte hybride DP-TP Strukturen, in denen ein teilausgehärtetes epoxidharzbasiertes Prepreg mit einem PP umspritzt wurde. Das Prepreg wurde nur teilweise gehärtet, um eine gewisse Handhabbarkeit des Materials, vor dem Einlegen in das Spritzgusswerkzeug, zu ermöglichen. Der Aushärteprozess darf aber auch nicht zu weit fortgeschritten sein, damit die endgültige Formgebung des hybriden Bauteils im Spritzgusswerkzeug erfolgen kann. Das Prepreg wird dabei durch den Druck des Spritzgussmaterials bewusst im Werkzeug verformt. Es wurde unter anderem, für unterschiedliche Aushärtegrade des Prepregs und Einspritztemperaturen des PP, die Scherfestigkeit getestet. Allerdings konnte diese nur sehr geringe Werte, im Bereich von ca. 2-3 MPa, aufweisen, was der Autor auf das nicht final ausgehärtete Prepreg zurückführte.

Schares [89] untersuchte das Anspritzen von unverstärktem Polyamid an teilausgehärtete DP-Strukturen mit der Nutzung eines Faser-Interfaces. Ziel war es, den Wärmeeinfluss durch die laserbasierte Freilegung der obersten Faserschicht zu mindern, damit keine Schädigung des darunterliegenden, bereits ausgehärtetem Epoxidharzes

auftritt. Mit unterschiedlichen Aushärtegraden der DP-Struktur konnte nachgewiesen werden, dass es bei der Herstellung von DP-TP Strukturen, mittels Laservorbehandlung der DP-Struktur, besser ist, teilausgehärtete DP-Strukturen zu nutzen. Dies wurde anhand der Versagenskraft von Bauteilen ermittelt, an denen Verrippungen aus PA angespritzt wurden.

Vollständig ausgehärteter DP Hier ist die duroplastische Struktur vor dem Fügeprozess bereits vollständig ausgehärtet und wurde, je nach Verfahren, durch unterschiedliche Methoden vorbehandelt. Dabei wirkt vor allem die spezifische Adhäsion beider Komponenten sowie auch die mechanische Adhäsion durch Mikroformschluss.

Goodarz et al. [97] erzeugten eine DP-TP Struktur im einfachen Heißpressverfahren. Hierbei wurden mehrere Lagen von bereits konsolidierten, glasfaserverstärkten TPU-Platten zwischen mehreren Lagen von bereits ausgehärteten, glasfaserverstärkten duroplastischen Polyester-Platten gelegt. Anschließend wurden diese, in eine Art Sandwichstruktur (das Organoblech befand sich nur in der Mitte), im Heißpressverfahren verpresst. Beide Materialien wurden dabei nicht vorbehandelt. Trotz der fehlenden Vorbehandlung kam es zu einer Anhaftung beider Materialien und zu einer erhöhten maximalen Dehnung, sowie einer höheren Schlagzähigkeit des hybriden Materials.

Ding et al. [82] fertigten Zug-Scher-Probekörper aus ausgehärtetem CFK Prepreg, welches mit kurzglasfaserverstärktem PA66 (15 Gew.-%) umspritzt wurde. Die DP-Struktur wurde entweder mit einem Silan-Haftvermittler benetzt, mit luftbasiertem Niederdruckplasma, oder mit einem CO₂-Laser behandelt. Mit Hilfe des CO₂-Lasers konnte ein Faser-Interface erzeugt werden, indem die Matrix weggeätzt und die Fasern freigelegt wurden. Hierbei wurden die höchsten Zug-Scherfestigkeiten erzielt, was die Autoren auf mechanische Verzahnung, mit den freigelegten C-Fasern zurückführten. Zusätzlich erhöhte sich der Anteil der funktionellen Carbonylgruppen auf der DP-Struktur, welche zu einer besseren Anhaftung beitragen. Das Niederdruckplasmaverfahren wurde nur mit einer kurzen Behandlungsdauer eingesetzt, wodurch die Oberfläche zwar aktiviert, die Fasern aber nicht freigelegt wurden.

Karakaya et al. [84,85] untersuchten in unterschiedlichen Veröffentlichungen das Umspritzen von epoxidharzbasiertem, endlosfaserverstärktem (Glas- und Kohlenstofffasern) FKV mit PA6. Dabei konnte festgestellt werden, dass durch die Nutzung von Abreißgewebe, die Anbindung des TP (mittels 3-Punkt Biegeversuch ermittelt) gesteigert werden konnte. Dies lässt sich auf das Aufrauen der Oberfläche zurückführen, also dem Erzeugen von Mikroformschluss und damit die Erhöhung der mechanischen Adhäsion. Außerdem trat eine Erhöhung der spezifischen Adhäsion auf, da durch das Abreißgewebe die Benetzbarkeit verbessert wurde sowie der Stickstoff- und Sauerstoffgehalt angestiegen ist. Bei der zusätzlichen Vorbehandlung der DP-Struktur mit unterschiedlichen Hotmelts (aufgelöste thermoplastische Schmelzklebstoffe), nach dem Abreißgewebe, konnte in einem Zug-Scher-Versuch nur eine geringe Steigerung der Festigkeit, mittels eines TPU-Hotmelts, festgestellt werden.

Schares [89] untersuchte zusätzlich zu den oben erwähnten, teilausgehärteten DP-TP Strukturen, auch vollständig ausgehärtete Strukturen. Bei diesen wurde ein Faser-Interface mittels Laservorbehandlung der DP-Struktur erzeugt. In einem Zug-Scher-Versuch konnte dadurch eine maximale Zugscherfestigkeit von $\tau = 27,7$ MPa zwischen

der DP-Struktur und dem angespritzten Polyamid erzeugt werden. Allerdings kommt es aufgrund der Wärmeeintragung des Lasers, zu einem Abfall der Festigkeit im CFK, da die Anbindung der C-Fasern an die darunter befindliche Epoxy-Schicht thermisch beschädigt wurde.

Des Weiteren gibt es Untersuchungen, die sich nicht in die oben genannten Bereiche einordnen lassen. Hierbei werden beispielsweise thermoplastische Fasern (PET) für die Erzeugung eines Epoxidharz basierten FKV genutzt [98]. Oder es wird das Interface zwischen thermoplastischen PVP-Folien und einer dünnen Schicht Epoxidharz untersucht [99].

2.4.4 Plasmabehandlung bei Faser-Kunststoff-Verbunden

Insbesondere die Vorbehandlung von Kohlenstofffasern in FKV mittels einer Plasmabehandlung wurde häufig untersucht [36, 100–104]. Das Ziel in den meisten Fällen ist, die benötigte Vorbehandlung der Fasern durch eine Plasmabehandlung, anstelle von anderen Verfahren, zu ermöglichen.

Chang [100] untersuchte den Einfluss von Ammoniak- und Sauerstoffplasma, bei der Vorbehandlung von Kohlenstofffasern, auf die Anbindung der Fasern an ein duroplastisches BMI-Harzsystem (Bismaleimid). Festgestellt wurde, dass eine zu lange Behandlung mit Sauerstoffplasma, die Kohlenstofffasern schädigt (Ammoniakplasma im gleichen Zeitraum jedoch nicht). Beide Plasmagase hatten jedoch einen positiven Effekt auf die Anbindung an das BMI-Harz.

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch *Ma et al.* [103], die den Einfluss von Sauerstoffplasma, bei der Vorbehandlung von Kohlenstofffasern, auf die Interface-Eigenschaften mit einem Epoxidharz untersuchten. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Vorbehandlung, sowohl die Benetzbarkeit (über die Erhöhung der Oberflächenenergie), als auch der Anteil der funktionellen Gruppen, insbesondere Carbonyl ($-C=O$) und Carboxyl ($-COOH$) sowie die daraus resultierende Interface-Festigkeit (gemessen über die interlaminae Scherfestigkeit) gesteigert werden kann. Alle drei Effekte erreichen aber ein Maximum zur gleichen Zeit und nehmen danach wieder stark ab. Des Weiteren wird die Faseroberfläche bei einer zu langen Behandlungsdauer beschädigt. Dies deutet ebenfalls auf eine Grenzdauer, bei der Behandlung von Kohlenstofffasern mittels Sauerstoffplasma, hin.

Lachner [101] verglich den Einfluss von Ammoniakplasma und einer anodischen Oxidation, als Vorbehandlungsmethode für Kohlenstofffasern, auf die Interface-Festigkeit. Es zeigte sich, dass die Art der funktionellen Gruppen ausschlaggebend für eine hohe Interface-Festigkeit ist. Dabei tragen die auf Stickstoff basierenden funktionellen Gruppen, welche durch das Ammoniakplasma erzeugt werden, kaum zu einer Steigerung der Anbindung bei. Die auf Sauerstoff basierenden funktionellen Gruppen, welche durch die anodische Oxidation erzeugt wurden, aber auch beim Sauerstoffplasma erzeugt werden können, tragen am stärksten zur Steigerung der Anbindung der Kohlenstofffasern an ein Epoxidharz-System bei.

Im Gegensatz zu den vorherigen Untersuchungen befasste sich *Robeck* [104] mit der An-

bindung von kurzen Kohlenstofffasern an thermoplastische Matrixsysteme (u.a. PA6). Hierfür wurden die erzielten Zugfestigkeiten des faserverstärkten Materials untersucht und dadurch ein Rückschluss auf die Anbindung der vorbehandelten Fasern an das Matrixmaterial gezogen. Die Kohlenstofffasern waren vor Beginn der Plasmabehandlung bereits mit einer passenden Schlichte für Polyamid 6 behandelt. Die Behandlung der Fasern erfolgt mittels Stickstoff und Luft im Atmosphärendruckplasma. Dabei konnte bei beiden Prozessgasen eine höhere Zugfestigkeit des faserverstärkten Materials, im Rückschluss also eine erhöhte Anbindung der Fasern an die PA6 Matrix, festgestellt werden. Mit Stickstoff als Prozessgas konnte eine bessere Festigkeitssteigerung (+6,4 %) als mit Luft (+2,4 %) festgestellt werden.

Zusammenfassend lassen sich, die in Tabelle 2.5 dargestellten funktionellen Gruppen, durch sauerstoff- oder stickstoffbasiertem Plasma, auf den Kohlenstofffasern bzw. dem Epoxidharz, erzeugen. Für die Anbindung des PA6 über dessen Carbonsäureamid-Gruppen an den vorbehandelten FKV, sind insbesondere die durch die Vorbehandlung erzeugten Hydroxid- und Carboxyl-Gruppen, aber auch freie Radikalstellen an den angebrachten Stickstoffatomen und Stickstoffmonoxiden, verantwortlich [104, 105].

Tab. 2.5: Auswahl der zu erwartenden funktionellen Gruppen an C-Fasern und Epoxid-Matrix nach [101, 103, 104, 106].

Funktionelle Gruppe		C-Faser	EP-Matrix
Carbonyl	-C=O	x	
Hydroxy	-C-OH	x	x
Carboxyl	-COOH	x	x
Aldehyd	-CO-H		x
Amino	-C-NH	x	

Kapitel 3

Zielsetzung

Das nachfolgende Kapitel weist anhand des Forschungsstandes und einer vereinfachten Prozesskette die Lücken in der Forschungslandschaft nach und formuliert daraus die zu untersuchenden Hypothesen. Im Anschluss daran wird das strukturelle Vorgehen der Arbeit dargestellt, um die genannten Hypothesen zu validieren.

3.1 Forschungshypothesen

Anhand des hybriden Auslegungs- und Fertigungsprozesses in Abbildung 3.1, welcher in Abbildung 4.1 detailliert beschrieben wird, sollen die Forschungshypothesen abgeleitet werden.

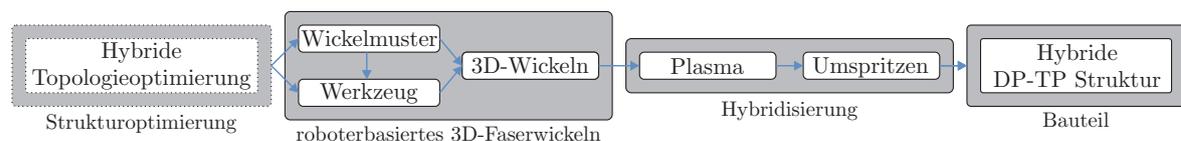


Abb. 3.1: Darstellung des hybriden DT-TP Fertigungsprozess.

Strukturoptimierung Der erste Schritt zur Erzeugung von hybriden DP-TP Strukturen, muss die Topologieoptimierung der Struktur sein, um zu berechnen, an welcher Stelle eine bestimmte Menge, eines bestimmten Verstärkungs-Materials, benötigt wird. Anhand dieser Ergebnisse kann dann die Wickelstruktur generiert werden, welche als Basis für die Erzeugung der hybriden Struktur dient. Diese Strukturoptimierung ist nicht Teil dieser Arbeit und wird als gegeben vorausgesetzt [107].

Roboterbasiertes 3D-Faserwickeln Höchste mechanische Festigkeits- und Steifigkeitswerte können mit endloskohlenstoffaserverstärkten, duroplastischen (insbesondere auf Basis von Epoxidharz) Materialien erzeugt werden. Die so erzeugten Strukturen

sind nur dann kosteneffizient und nutzen das Potenzial des Endlosfasern effizient aus, wenn das Material in der richtigen Orientierung nur dort eingesetzt wird, wo es aus mechanischer Sicht benötigt wird (bekannt durch die Topologieoptimierung). Dadurch ergeben sich meist fachwerkartige Strukturen. Für die automatisierte Fertigung solcher Strukturen soll das roboterbasierte 3D-Faserwickeln genauer betrachtet und im Detail untersucht werden. Folgende Punkte werden dabei berücksichtigt:

- computerbasierte Ableitung der Wickelmuster aus der Topologieoptimierung
- lokale Variation der abzulegenden Faserstränge (automatisiertes Durchtrennen und Wiederanlegen)
- Untersuchung der benötigten Werkzeugeigenschaften für das roboterbasierte Faserwickeln mit TowPreg
- Fadenspannungseinfluss beim Wickeln mit TowPreg auf die Festigkeits- und Steifigkeitswerte

Hypothese 1: Es ist möglich, topologieoptimierte Strukturen computergestützt so in einzelne Wickelmuster aufzuteilen, dass diese mittels eines geeigneten Wickelkopfes, bei einer definierten Fadenspannung, mit lokal anpassbarer Anzahl von TowPreg-Strängen, so gewickelt werden können, dass immer nur das minimal benötigte Material zum Übertragen der Kräfte vorhanden ist.

Vorbehandlung Aktuelle Untersuchungen zu DP-TP Strukturen nutzen nur in einem Fall ein Faser-Interface. Allerdings werden hier, aufgrund des CO₂-Lasers, die Fasern nur freigelegt und nicht signifikant mit funktionellen Gruppen aktiviert. Auch eignet sich dieses Verfahren eher zu einer lokalen Vorbehandlung von Bauteilen. Des Weiteren ist, bei der Verwendung von Lasern, der Wärmeeintrag kritisch, da hierdurch auch die unterhalb des abgetragenen Matrixmaterials befindlichen Epoxid-Schichten geschädigt werden können.

Hypothese 2: Mit Hilfe einer Vorbehandlung im Niederdruckplasmaverfahren ist es möglich, duroplastische Strukturbauteile mit großen Abmessungen in einer kurzen Zeitdauer vorzubehandeln, sodass ein belastbares Faser-Interface, auf dem Niveau von strukturellen Klebungen, zu einem thermoplastischen Material erzeugt wird.

Hybridisierung Die beim Faserwickeln erzeugten Strukturen weisen zwar höchste spezifische Festigkeits- und Steifigkeitswerte auf, jedoch wirken sich andere Aspekte negativ auf den Prozess auf. So sind eine Funktionalisierung, flächige Bereiche, sowie hohe Bauteilqualitäten nur ineffizient, oder durch ein hohes Maß an Nachbearbeitung realisierbar. Des Weiteren spricht die erzielte Oberflächenqualität der Bauteile gegen einen direkten Einsatz. Um die Nachbearbeitung zu verringern, soll das Spritzgussmaterial diese Bereiche kaschieren. Auch kann durch den Einsatz von Spritzgussmaterial, die zu wickelnde endlosfaserverstärkte Struktur vereinfacht werden, da das Spritzgussmaterial lasttragende Funktionen übernehmen kann.

Hypothese 3: Eine Hybridisierung des roboterbasierten 3D-Wickels im Spritzgussverfahren ermöglicht ein neues und lastpfadoptimiertes Fertigungsverfahren, mit hohen spezifischen Steifigkeitswerten, welches die Nachteile des alleinigen roboterbasierten 3D-Wickels überwindet bzw. die Steifigkeitswerte von Spritzgussbauteilen stark erhöht.

3.2 Strukturierung der Arbeit

Die eben aufgestellten Hypothesen sollen im Rahmen dieser Arbeit überprüft werden. Aufgrund des hohen interdisziplinären Charakters dieser Arbeit, wird das Vorgehen durch eine logische Struktur, wie in Abbildung 3.2 gezeigt, unterstützt.

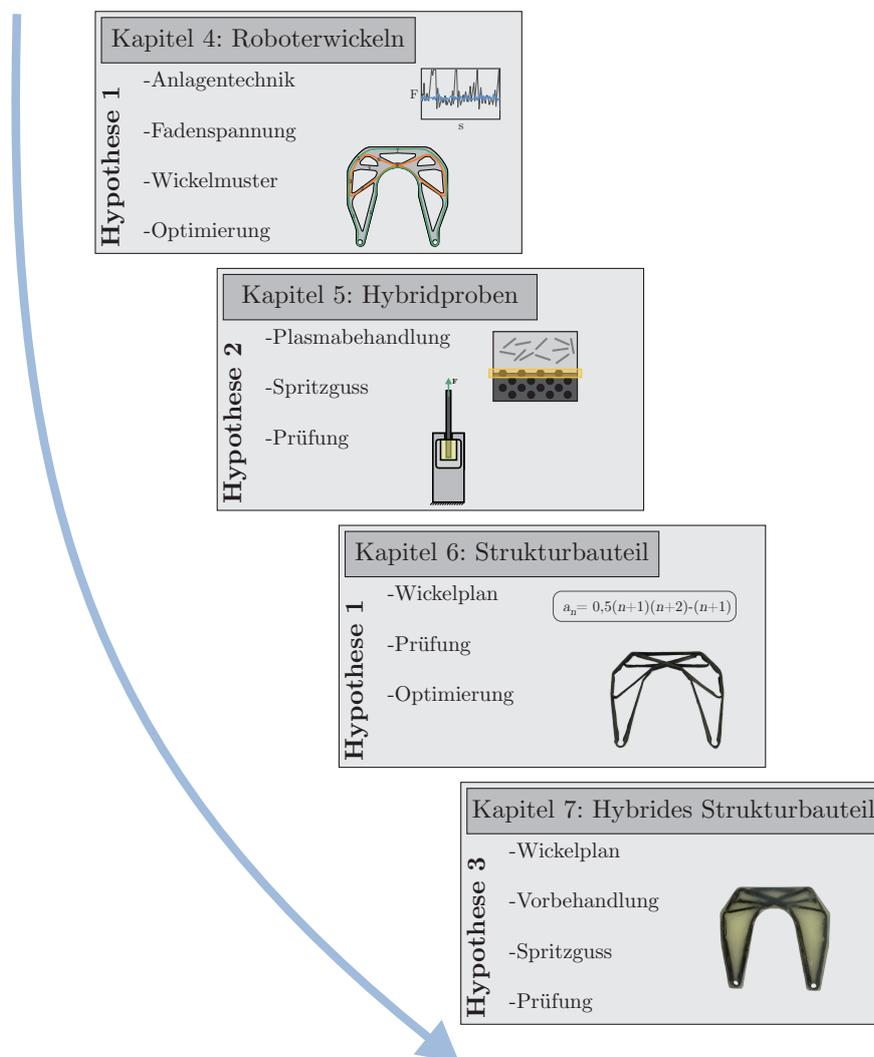


Abb. 3.2: Strukturierung der vorliegenden Arbeit mit der Bearbeitung der Hypothesen in den dazugehörigen Kapiteln.

In *Kapitel 4* wird der vollständige Prozess des roboterbasierten 3D-TowPreg-Faserwickelns gezeigt. Dieser beginnt mit der Einordnung des Wickelns in den Gesamtprozess des DP-TP Fertigungsverfahrens. Anschließend wird die automatisierte Generierung der Wickelpfade anhand eines Demonstrators dargelegt. Die für diese Arbeit entwickelte Wickelanlage samt Werkzeug, Wickelkopf und Trenneinheit wird daraufhin beschrieben. Abschließend wird der Einfluss der Fadenspannung auf die Druckfestigkeit gewickelter CFK-TowPreg-Proben, mittels eines neuartigen Wickelwerkzeuges, gezeigt. Im Anschluss daran wird in *Kapitel 5* auf die Hybridisierung von duroplastischem, epoxidharzbasiertem UD-CFK mit thermoplastischem, kurzglasfaserverstärktem Polyamid 6 eingegangen. Es wird ein Herstellungsverfahren für gewickelte Probekörper zum Test der Interface-Festigkeit gezeigt und auf unterschiedliche Vorbehandlungsmethoden der CFK-Proben eingegangen. Ebenfalls wird ein Testverfahren zum Überprüfen der Interface-Festigkeit dargestellt. Der Fokus der Vorbehandlungen wird dabei auf das Niederdruckplasmaverfahren gelegt.

Im darauffolgenden *Kapitel 6* wird ein anisotrop topologieoptimiertes Strukturbauteil (Brakebooster) anhand der im *Kapitel 2* beschriebenen Wickelpfade gefertigt. Es wird hinsichtlich der spezifischen Steifigkeit geprüft und mit Brakeboostern anderer Herstellungsart verglichen, um das Potential des roboterbasierten 3D-TowPreg-Faserwickelns aufzuzeigen.

Mit den Ergebnissen aus den beiden vorherigen Kapiteln, wird in *Kapitel 7* eine hybrides Strukturbauteil als Nachweis der Effektivität des hier vorgestellten Verfahrens gezeigt. Es wird der Herstellungsprozess beschrieben und ein Vergleich der erzielten spezifischen Steifigkeit, mit den Werten des anisotropen Strukturbauteils aus *Kapitel 6*, durchgeführt.

In Tabelle 3.1 ist eine Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Materialien gegeben. Diese beinhaltet das endloskohlenstofffaserverstärkte TowPreg und das kurzglasfaserverstärkte PA6GF30. Zusätzlich zur vollständigen Bezeichnung des Herstellers ist auch noch das jeweilige Kapitel angegeben, in dem das Material genutzt wird.

Tab. 3.1: Verwendete Materialien in dieser Arbeit; endloskohlenstofffaserverstärktes TowPreg und kurzglasfaserverstärktes Spritzguss-Material.

Bezeichnung	Hersteller	Faser	Faseranteil	Matrix	Verwendung
C-TowPreg					
UF3376-100-T700SC-12K-50C	TCR Composites	T700SC 12K	60 Vol.-%	UF3376 (EP)	Kapitel 4
UF3325-97-T700SC-12K-50C	TCR Composites	T700SC 12K	60 Vol.-%	UF3325 (EP)	Kapitel 5
Spritzguss					
NYLFOR B2 GF/30	Celanese	Kurzglasfasern	30 Gew.-%	PA6	Kapitel 5
GRODNAMID PA6-GF30P-1	Grodno Khimvolkno	Kurzglasfasern	30 Gew.-%	PA6	Kapitel 5

Kapitel 4

Roboterbasiertes 3D-TowPreg-Faserwickeln

Im vorliegenden Kapitel wird genauer auf die speziellen Eigenschaften des roboterbasierten 3D-TowPreg-Faserwickelns eingegangen sowie auf die Einordnung in den hybriden DP-TP Prozess. Dabei spielt das Design des zu bewickelnden Fadenträgers bei der Erzeugung von Bauteilen eine wichtige Rolle. Des Weiteren wird auf die spezielle Anlagentechnik des Wickelkopfes, mit Trenneinheit und der Erzeugung der Fadenspannung, eingegangen. Der Einfluss dieser Fadenspannung auf die Festigkeit von gewickelten Proben wird zusätzlich betrachtet. Am Ende dieses Kapitels wird die computerbasierte Erzeugung der Wickelmuster genauer beschrieben.

4.1 Einordnung im Gesamtprozess

Das roboterbasierte 3D-TowPreg-Faserwickeln ist, aufgrund seiner Automatisierung, der Designfreiheit und dem effektiven Ausnutzen der Endlosfasern, essenzieller Bestandteil des hier vorgestellten hybriden DP-TP Fertigungskonzeptes. In Abbildung 4.1 ist die Lage im Gesamtprozess noch einmal dargestellt.

Für die optimale Ausnutzung der verwendeten Materialien muss der Fertigungsprozess mit einem angepassten Strukturoptimierungsverfahren, wie etwa der hybriden Topologieoptimierung nach *Mehl et al.* [23], starten. Die hier berechneten Hauptlastpfade, die durch die Endlosfaserverstärkung abgebildet werden, legen somit die benötigten Wickelmuster und dementsprechend auch die benötigte Geometrie des Fadenträgers fest. Über die Breite der Lastpfade wird, in gewissen Grenzen, auch schon der Roving-Typ für das TowPreg-Material festgelegt. Für feinere Strukturen sollte demnach ein schmaler Roving von maximal 12K, für grobe Strukturen ein breiterer Roving von bis zu 50K verwendet werden.

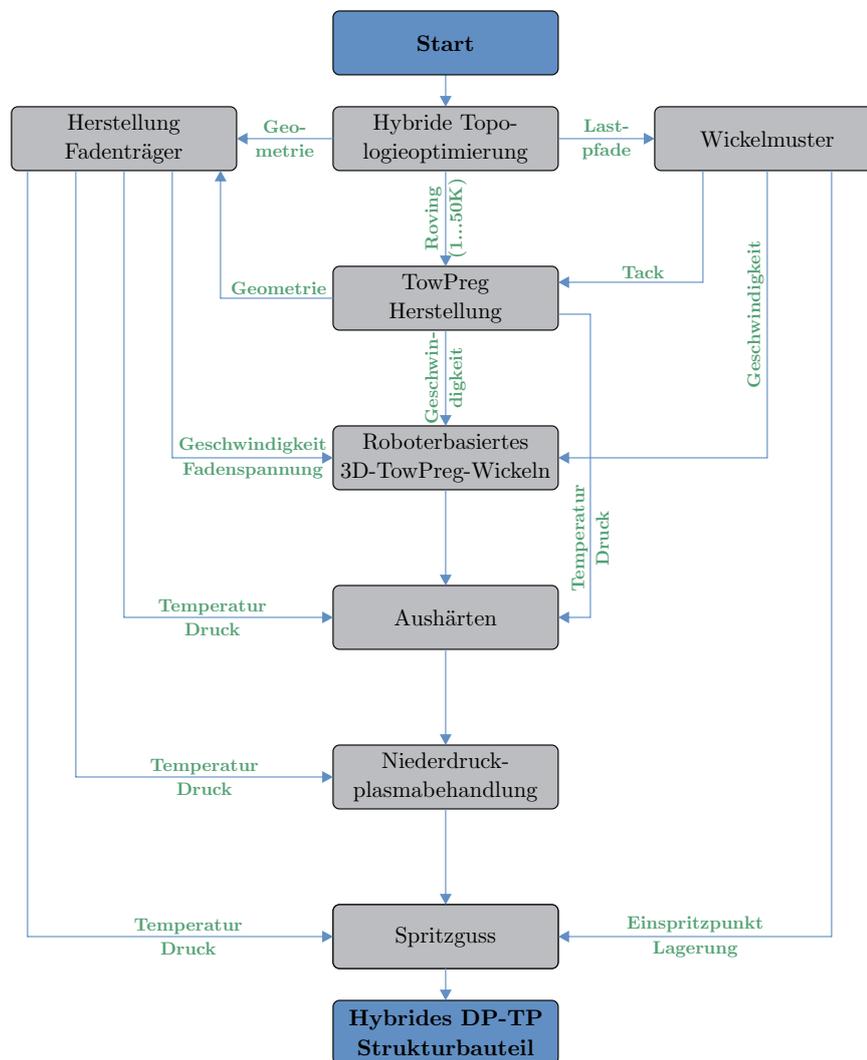


Abb. 4.1: Schritte im hybriden DP-TP Fertigungsverfahren mit den jeweiligen Beeinflussungen untereinander (grün) nach *Bauer et al.* [51].

Damit der Fertigungsprozess kosteneffizient bleibt, sollte das TowPreg-Material kurz vor der Benutzung (selbst) hergestellt werden. Dies ist auch in kleineren Mengen möglich und wurde im Labormaßstab nachgewiesen [108–110]. Aufgrund dessen können Herstellungs-, Transport- und Lagerkosten gespart werden. Auch ist es dadurch möglich, die gewünschten Eigenschaften des TowPreg-Materials auf das jeweilige Bauteil anzupassen. Denn über die Wickelpfade kann, beim benötigten Verlassen von geodätischen Bahnen, auch ein hoher oder niedriger Tack das Materials benötigt werden, was wiederum das Wickelwerkzeug beeinflusst. So können eventuell Umlenkungspunkte in Form von Pins oder Kanälen eingespart werden, wenn der Tack des Materials an die Wickelpfade angepasst wird.

Die Geschwindigkeit beim roboterbasierten 3D-Faserwickeln wird vor allem durch das verwendete TowPreg-Material, die berechneten Wickelpfade, sowie die Geometrie des

Wickelwerkzeuges definiert, bzw. limitiert. Ebenfalls hat das verwendete Fadenspannungssystem am Wickelkopf der Anlage einen hohen Einfluss auf die maximale Ablegegeschwindigkeit des Materials. Nur wenn die Fadenspannung, durch das Fadenspannungssystem, auch bei hohen Geschwindigkeiten konstant gehalten wird, kann das Wickelsystem schnell arbeiten. Des Weiteren begrenzen die Festigkeit und Steifigkeit des Fadenträgers die zulässige Fadenspannung im Wickelverfahren.

Der anschließende Aushärtprozess wird vor allem durch das verwendete Matrixmaterial bestimmt, welches die benötigten Temperaturen und Drücke festlegt. Das Material des verwendeten Fadenträgers bestimmt ebenso die maximal zulässigen Aushärtetemperaturen, vor allem wenn es sich um nichtmetallische Materialien handelt. Gleiches gilt für den zulässigen Druck, der den Fadenträger unter Temperatur nicht verformen darf.

Die anschließende Vorbehandlung im Niederdruckplasmaverfahren wird durch die Bauteilgröße (benötigte Größe der Plasmakammer) beeinflusst. Es gilt zu beachten, ob ein Kernmaterial in der Struktur zurückbleibt oder die gewickelte Struktur nach dem Aushärten vom Fadenträger getrennt wird. Ersteres führt dazu, dass das Kernmaterial den Temperaturen in der Plasmakammer standhalten muss. Außerdem muss auf ein Ausgasen des Materials geachtet werden, was dazu führen kann, dass der benötigte Unterdruck in der Plasmakammer nicht erreicht wird.

Der letzte Prozessschritt, das Umspritzen der Struktur, wird stark durch die Geometrie der Wickelstruktur selbst beeinflusst. Diese legt fest, an welchen Stellen im Spritzgusswerkzeug das Bauteil gelagert werden muss und wo sich der Einspritzpunkt befindet. Wird auch hier eine Wickelstruktur mit Kern benutzt, muss darauf geachtet werden, dass die Temperaturen sowie der Einspritzdruck im Spritzgussprozess, den Kern nicht beschädigen.

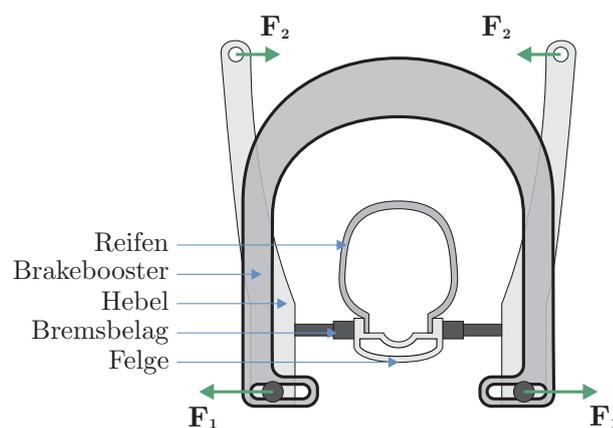


Abb. 4.2: Belastungsfall eines schematischen Brakeboosters.

Im Folgenden wird noch einmal genauer auf die Wickelanlage mit dem Wickelkopf als Hauptbestandteil für die Erzeugung der Fadenspannung, die Details des Fadenträgers, sowie die Generierung der Wickelmuster, eingegangen. Der letzte Punkt wird dabei erst allgemeingültig und dann exemplarisch anhand eines Demonstrators, einem sog. Brakeboosters (siehe Abbildung 4.2) dargelegt. Bei diesem symmetrischen Bauteil greifen die identischen Kräfte F_1 jeweils in den Lasteinleitungspunkten entgegengesetzt an. Diese

Struktur dient als eine Art Bremskraftverstärker bei der Einleitung von Bremskräften (über F_2 der Kipphebel) bei Fahrrad-Felgenbremsen (V-Brakes). Er soll das System versteifen und die Verformung der Lagerpunkte an der Fahrradgabel verringern. Die Felgenbremse hat zwar heutzutage nahezu keine Relevanz mehr, allerdings wurde dieses Bauteil schon in unterschiedlichen Materialien (Aluminium, CFK) und Optimierungen im wissenschaftlichen Kontext betrachtet [111–113]. Ziel bei diesem Bauteil ist es, eine hohe spezifische Steifigkeit, also Steifigkeit pro Masse, zu erreichen.

4.2 Wickelanlage

Die Wickelanlage an der HS Pforzheim ist nach Konzept C, aus der Abbildung 2.14 in Abschnitt 2.4.2, aufgebaut. Beim Industrieroboter handelt es sich um einen *KUKA KR 120* mit einer Zusatzachse vom Typ *KP1-H250*, die vollständig in die Robotersteuerung integriert ist. Dabei befindet sich am Flansch des 6-Achs-Industrieroboters ein im Rahmen der Arbeit entwickelter Wickelkopf. Das zu fertigende Bauteil wird auf der externen, siebten Achse, auf einem Fadenträger gefertigt (Abbildung 4.3). Im Folgenden soll genauer auf den Aufbau und die Eigenschaften des Fadenträgers und des Wickelkopfes, im speziellen der Erzeugung der Fadenspannung, sowie dem Wickeln mit einer variablen Fadenanzahl, eingegangen werden.

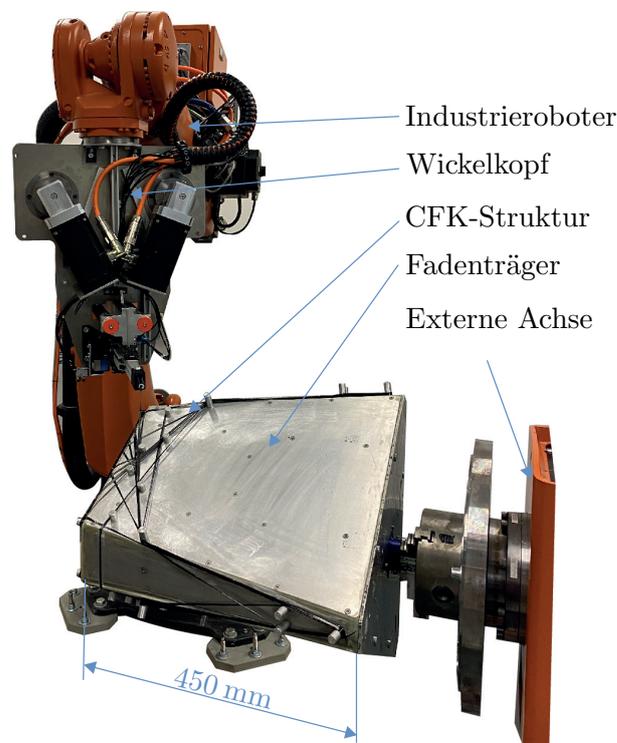


Abb. 4.3: Wickelanlage an der HS Pforzheim mit Wickelkopf, Fadenträger und CFK-Struktur nach *Bauer et al.* [51].

4.3 Fadenträger

Im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren kann zwischen unterschiedlichen formgebenden Hilfsmitteln für die zu erzeugende Struktur unterschieden werden. Diese Fadenträger können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden.

Wickelkern Verbleibt der formgebende Körper in der Struktur, so spricht man von einem Wickelkern. Dieser Kern ist meist aus einem druck- und temperaturfesten Schaum, damit dieser während der Aushärtung formstabil und ausreichend tragfähig bleibt. Er sollte auch eine möglichst geringe Dichte aufweisen, sodass die spezifischen Bauteileigenschaften auf einem hohen Niveau bleiben. Bei der Auswahl der Schäume müssen unterschiedliche Punkte berücksichtigt werden. So muss anhand des Härteprozesses, der durch das TowPreg-Material vorgegeben ist, die Druck- und Temperaturfestigkeit ausgewählt werden. Anhand der Kräfte im Wickelprozess, die durch die Fadenspannung hervorgerufen werden, muss auch die Festigkeit und Steifigkeit des Materials für das jeweilige Bauteil berücksichtigt werden. Alternativ können manche Schäume nach dem Aushärteprozess, mittels Lösemittel, vom Strukturbauteil getrennt werden. Jedoch erweist sich dies als ein aufwendiger und kostenintensiver Prozess.

Wickelwerkzeug Wird der formgebende Körper nach dem Aushärten entfernt, handelt es sich im Regelfall um metallische Werkzeuge. Diese haben den Vorteil, dass die Druck- und Temperaturbelastungen im Aushärteprozess unkritisch sind. Allerdings muss die thermische Ausdehnung, vor allem bei Aluminium-Werkzeugen, mit einbezogen werden. Dadurch kann es, bei hohen Aushärtetemperaturen, zu Abweichungen in den Abmessungen des gewickelten Strukturbauteils kommen. Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich metallische Wickelwerkzeuge als Fadenträger genutzt.

In roboterbasierten 3D-Wickelverfahren können nun unterschiedliche Ablegepfade des Materials ermöglicht werden. Sowohl für zylindrische, wie auch ebene Flächen, können die folgenden vier Grundpfade aus Abbildung 4.4 gewickelt werden.

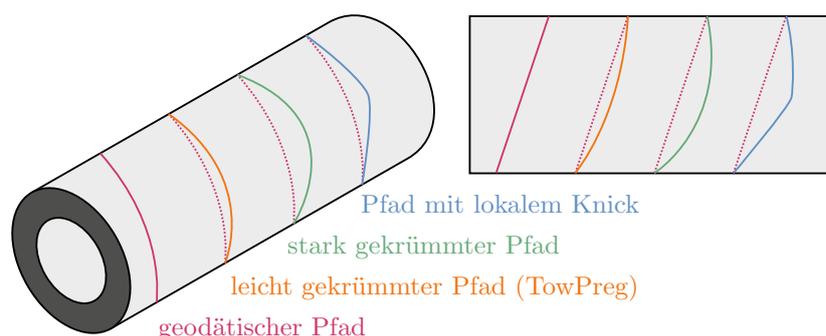


Abb. 4.4: Unterschiedlich stark gekrümmte Wickelpfade, dargestellt auf einem Zylinder und als Abwicklung auf einer ebenen Fläche nach *Bauer et al.* [51].

Der geodätische Pfad entspricht der kürzesten Verbindung zweier Punkte auf einer gekrümmten Oberfläche. Auf einer Ebene würde dies einer Geraden gleich kommen. Diese Wickelpfadgeometrie ist mit allen Wickelverfahren und -materialien herstellbar, da kei-

ne Haftkräfte zwischen dem Fadenträger und dem Filament benötigt werden [114]. Ein leicht gekrümmter Pfad ist möglich, wenn das imprägnierte Filament, entweder durch In-situ Imprägnierung oder bereits vorimprägniertes TowPreg, eine gewisse Klebrigkeit, also Tack, aufweist. Durch die Haftung zwischen dem imprägnierten Filament und dem Fadenträger können so die geodätischen Bahnen verlassen werden. Wie weit diese Bahnen verlassen werden können, hängt hauptsächlich von der Breite des Filaments und der Viskosität des Matrix-Materials ab. Hierbei gilt, je höher die Viskosität und je breiter das Filament, desto stärker können die geodätischen Bahnen verlassen werden [115]. Da bei der klassischen In-situ Imprägnierung nur relativ niedrig viskoses Harz genutzt werden kann, um eine gute Benetzung der Fasern zu gewährleisten, ist das TowPreg-Material in diesem Fall die bessere Wahl, da sich das Matrix-Material in einem hochviskosen B-Stage befindet. Die Höhe des Tacks des TowPregs und die Filamentanzahl bestimmen also, wie eng die Kurvenradien sein können. Im klassischen Wickelverfahren sind solche Pfade daher nur sehr begrenzt möglich.

Stark gekrümmte Pfade sind nur mit Hilfsmitteln in formgebenden Körpern möglich. Dies können beispielsweise Anlieger (ähnlich einer Steilkurve), Kanäle, Pins oder Lasteinleitungselemente, wie in Abbildung 4.5 zu sehen, sein. Dabei sind Anlieger einfacher zu wickeln, da das Filament nur von einer Seite der Form begrenzt wird. Bei Kanälen muss das Filament genauer abgelegt und im Kanal platziert werden. Anlieger ermöglichen somit engere Kurvenradien. Allerdings ist durch die beidseitige Begrenzung des Filaments bei Kanälen eine klare geometrische Begrenzung vorhanden, was nach dem Aushärten, eine klarer definierte Kontur, als bei Anliegern, ergibt.

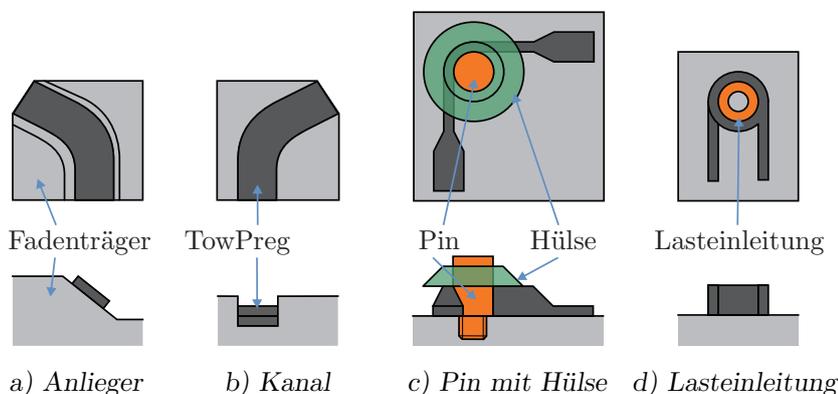


Abb. 4.5: Beeinflussung des formgebenden Körpers zur Erzeugung von stark gekrümmten Pfaden (mit optional vorhandenem Knick) nach *Bauer et al.* [51].

Soll ein lokaler Knick zusätzlich zum stark gekrümmten Pfad, oder separat, erstellt werden, können Pins oder Lasteinleitungselemente aus Abbildung 4.5 genutzt werden. Lasteinleitungselemente sind hierbei zu bevorzugen, da diese bereits im formgebendem Körper berücksichtigt werden und somit nicht zusätzlich hinzugefügt werden müssen. Auch können durch Umwickeln der Lasteinleitungselemente diese direkt in der Wickelstruktur befestigt werden. Bei beiden Hilfsmitteln ist auf die Kompaktierung des TowPregs zu achten. Da das TowPreg-Material einen rechteckigen Querschnitt aufweist, kann es sein, dass sich das Material beim Umwickeln der Pins oder Lasteinlei-

tungselementen aufstellt (siehe Abb. 4.5c). Dies ist insbesondere dann kritisch, wenn die restlichen Bereiche der Wickelstruktur in einem anderen Winkel zur formgebenden Geometrie abgelegt werden. Als Kompaktierungshilfe können dann sogenannte Hülsen (Abbildung 4.5a) zur lokalen Kompaktierung, oder Stempel mit Aussparungen im Bereich der Pins/Lasteinleitungselemente, genutzt werden.

4.4 Wickelkopf

Der Wickelkopf ist der Hauptbestandteil der Wickelanlage und wird über eine externe SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) gesteuert und ist auf die Nutzung von TowPreg-Material zum Wickeln der Bauteile ausgelegt. TowPreg besitzt, gegenüber den anderen duroplastischen Materialien, aufgrund der bereits vorhandenen Imprägnierung der Fasern, die folgenden Vorteile:

- höhere Wickelgeschwindigkeiten aufgrund der besseren Anhaftung des im B-Stage befindlichen Matrixmaterials an den Fasern
- geringere Anlagenkomplexität und Reinigungsaufwand aufgrund des nicht benötigten Imprägnierbades
- Fadenspannung ist unabhängig vom FVG einstellbar, das diese den FVG nicht beeinflusst, wie etwa beim In-situ Imprägnieren
- besserer Schutz der Fasern, durch die bereits vorhandene Matrix, vor mechanischen Beschädigungen an den Umlenkpunkten der Anlage
- konstanter FVG und damit hohe und gleichbleibende mechanische Eigenschaften
- höherer Tack (Klebrigkeit) des Materials, was ein Verlassen von geodätischen Bahnen (siehe Abschnitt 4.3) und die Realisierung von stärkeren Krümmungen, beim Wickeln ohne Umlenkpunkte, ermöglicht

Nachteilig an der Verwendung von TowPreg-Materialien sind vor allem die Punkte:

- teureres Material, als nur die Kombination der Preise von Endlosfasern und Matrix-Material, wie etwa bei der In-situ Imprägnierung
- geringe Marktverfügbarkeit, da wenig genutztes Material
- Lagerung des Materials bei ca. $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, um eine Haltbarkeit im Bereich von mehreren Monaten zu gewährleisten
- nur thermisches Recycling möglich, da im Gegensatz zu thermoplastischen Materialien nicht wieder schmelzbar
- Verarbeitungsfähigkeit per Roboter muss sichergestellt sein, also das automatisierte Abwickeln des TowPregs mit hohen Geschwindigkeiten muss möglich sein

Der Hauptvorteil bei der Nutzung einer externen SPS ist die Variabilität und Erweiterbarkeit. Durch das Anbringen von weiteren Modulen kann der Funktionsumfang der kompletten Wickelanlage erweitert werden. So befinden sich in der SPS auch weitere Zusatzfunktionen, wie die Steuerung der Lichtschranken, der externe Not-Aus der

Roboter-Steuerung, eine automatische Stopp-Funktion des Roboters bei einem Riss des TowPreg-Stranges, sowie die später gezeigte Trenn- und Anlegeeinheit. Die Hauptaufgaben des Wickelkopfes sind das Speichern des TowPreg-Materials (hier zwei Spulen), die Erzeugung der Fadenspannung und das präzise Ablegen des Materials auf dem Fadenträger. Es muss darauf geachtet werden, dass das Material ohne zu Verdrillen und zu Beschädigen von der Spule auf den Fadenträger abgelegt werden kann.

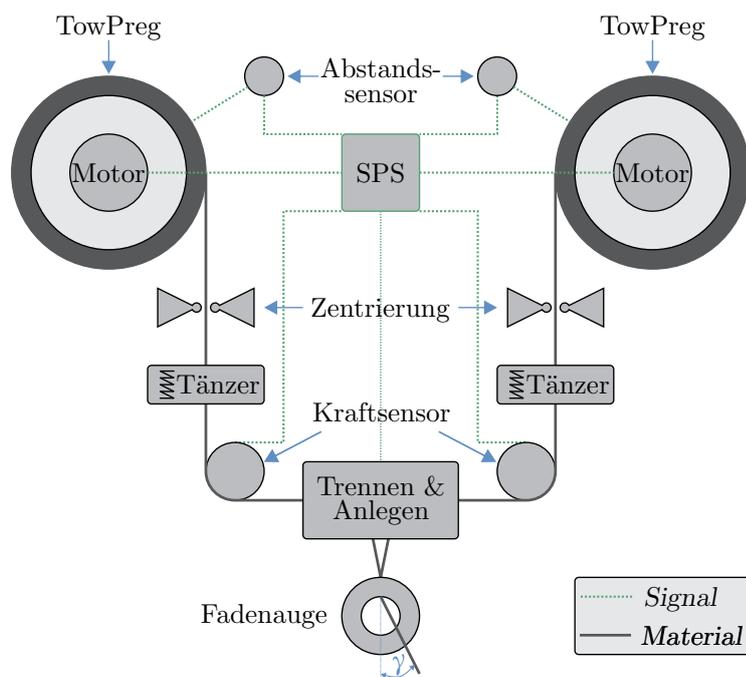


Abb. 4.6: Schematische Darstellung des Wickelkopfes inkl. Material- und Signalfluss sowie des Umlenkungswinkels γ des TowPregs am Fadenaugen.

Der Wickelkopf beinhaltet die in Abbildung 4.6 dargestellten Komponenten. Der Hauptpfad des Materials geht dabei von der Materialrolle, über unterschiedliche Umlenkrollen (Zentriereinheit), zum Tänzersystem. Anschließend wird das TowPreg am Kraftsensor ein letztes Mal umgelenkt und durch die Trenn- und Anlegeeinheit zum Fadenaugen geführt, welches das Material letztendlich auf dem Fadenträger ablegt. Beim Wickeln ist darauf zu achten, dass der Umlenkungswinkel γ des TowPreg-Stranges am Fadenaugen so klein wie möglich ist. Kommt es beim Wickeln von Bauteilen zu hohen Umlenkungswinkeln, kann das TowPreg am Fadenaugen, durch Reibung, beschädigt werden.

4.4.1 Erzeugung der Fadenspannung

Im Gegensatz zum klassischen Wickelverfahren müssen im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren die Endlosfasern nicht nur abgewickelt, sondern aufgrund der komplexen und räumlichen Bewegungsmöglichkeiten des Roboters, auch kurzzeitig wieder aufgewickelt werden. All dies geschieht bei hohen Verfahrensgeschwindigkeiten des Roboters. Dies führt dazu, dass kein klassisches Abwickelssystem, wie etwa eine Magnetpul-

verbremse, für die Erzeugung der Fadenspannung möglich ist [79, 116]. Es muss dafür gesorgt werden, dass die Fasern mit definierter Kraft (Fadenspannung) auf- und abgewickelt werden können. Aus diesem Grund werden, für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Fadenspannungssystem, Asynchron-Motoren eingesetzt.

Die Fadenspannung ist die zu regelnde Größe, die durch ein Moment am E-Motor erzeugt wird. Dafür wird zu Beginn, über eine zuvor ermittelte Fadenspannungs-Drehmoment-Kennlinie, ein Startmoment vorgegeben, das dann, mittels eines Vergleichs der Soll- und Ist-Fadenspannung, über eine Regelung fortlaufend korrigiert wird (Abb. 4.7) [117]. Die Hauptstörrößen in diesem System sind die instationäre Reibung, der sich ändernde Radius der TowPreg-Rolle und die Geschwindigkeit, mit der das Material von der Spule gezogen wird (Abzugsgeschwindigkeit). Zur Minimierung der Reibung wurde darauf geachtet, dass so wenig Umlenkpunkte wie möglich im System vorhanden sind und diese alle über Rollen realisiert werden. Außerdem sollte beim Programmieren der Wickelmuster (siehe Abschnitt 4.6) berücksichtigt werden, dass der Abzugswinkel aus dem Fadenauge möglichst konzentrisch ist, um die Regelung weniger stark zu beeinflussen. Die Abzugsgeschwindigkeit ergibt sich aus der Geometrie der zu wickelnden Struktur, sowie der Roboterbewegungen beim Erzeugen der Wickelmuster.

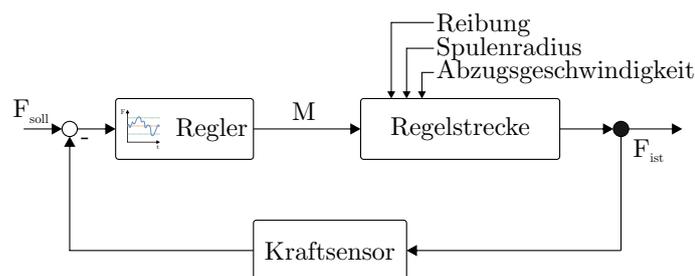


Abb. 4.7: Darstellung des Regelkreises für die Erzeugung der Fadenspannung.

Aufgrund der sich schnell ändernden Abzugsgeschwindigkeiten, durch die räumliche Bauteilgeometrie und der Verfahrensgeschwindigkeiten des Industrieroboters im roboter-basierten 3D-Wickelverfahren, reicht dieses elektrische Regelsystem alleine nicht aus. Deshalb wird zur Unterstützung des Reglers ein lineares, mechanisches Tänzersystem, das auf einer Druckfeder basiert, integriert. Dieser Tänzer dient als schnell reagierender Puffer und kann somit die Peaks in der Fadenkraft nahezu ohne Verzögerung abfangen, was eine stabile Regelung der Fadenkraft ermöglicht.

Für eine generische Struktur konnten die beiden folgenden Kraft-Zeit-Kurven der Fadenspannung aufgenommen werden (Abb. 4.8). Einmal ohne den Einsatz des linearen, mechanischen Tänzersystems ($F = 68,2 \pm 29,7 \text{ N}$) und einmal mit ($F = 58,6 \pm 4,9 \text{ N}$). Wie zu erkennen ist, kann durch den Einsatz des Tänzers die gewünschte Fadenspannung von $F = 60 \text{ N}$ im Mittelwert genauer erreicht werden. Insbesondere können die Peaks in der Fadenspannung mit Tänzer besser geregelt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass der Code zur Regelung der Fadenspannungseinheit leicht geändert werden musste, damit der mechanische Tänzer optimal funktioniert. Es wird also nicht der reine Einfluss des Tänzers, ohne andere Änderungen, dargestellt.

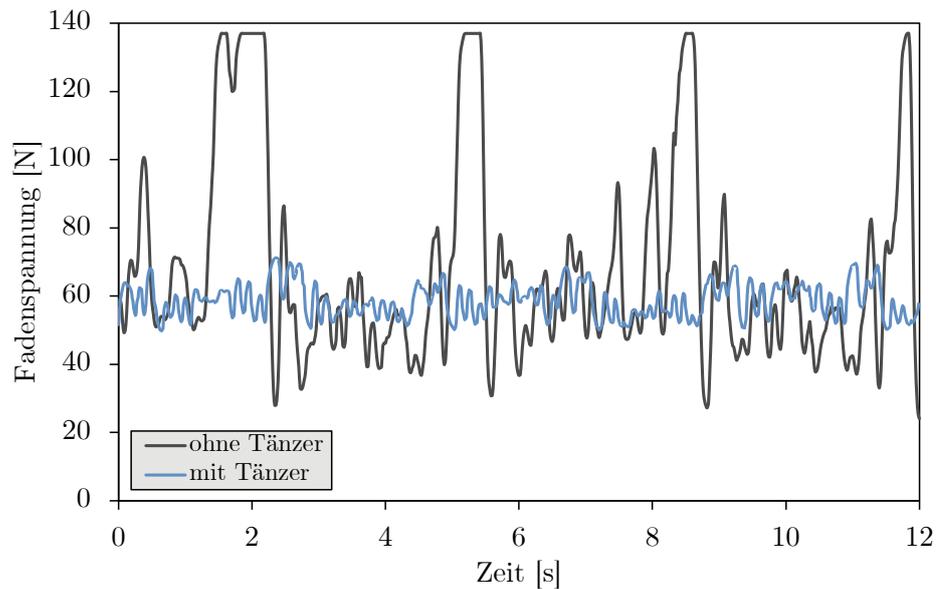


Abb. 4.8: Kurvenverlauf der Fadenspannung eines generischen Bauteils mit und ohne Einsatz des mechanischen Tänzers.

4.4.2 Wickeln mit variabler Fadenanzahl

Ein weiteres integriertes Teilsystem im Wickelkopf, welches im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und aufgebaut wurde, ist die automatisierte Trenn- und Anlegeeinheit. Beim roboterbasierten 3D-Faserwickeln kann es vorkommen, dass einzelne Teilbereiche des Bauteils, aufgrund der Zusammensetzung der Wickelmuster, zu häufig überfahren werden und damit teilweise zu viel Material abgelegt wird, was ein Hauptnachteil dieses Verfahrens gegenüber dem automatisierten Tapelegen ist. Dies ist beispielsweise in dem im Folgenden gezeigten Brakebooster aus Abschnitt 4.7 der Fall.

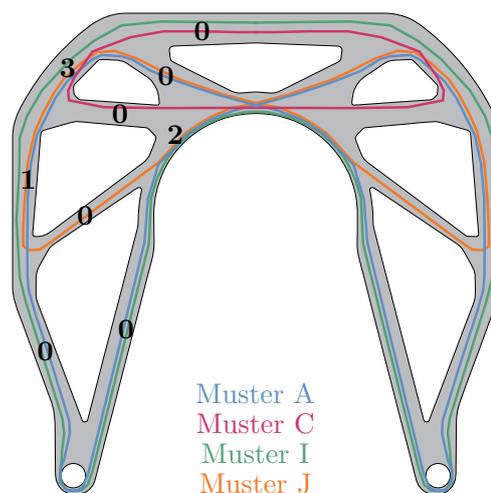


Abb. 4.9: Brakebooster mit vorhandenen Wickelmustern und Angabe der zu hohen Lagenanzahl im jeweiligen Bereich.

In Abbildung 4.9 ist der optimierte Brakebooster, inklusive einiger Wickelmuster, die unterschiedlich oft abgefahren werden müssen (siehe Abschnitt 4.7.3), dargestellt. Des Weiteren ist angegeben, wie viele Lagen in den jeweiligen Bereichen zu viel vorhanden sind (Teilstrukturen mit zu wenig Lagen sind nicht zulässig). Aufgrund der Optimierung ist dies, mit den vorhandenen Wickelmustern, das Ergebnis mit den wenigsten überflüssigen Lagen.

Eine Möglichkeit dieses Problem der lokalen Lagenanhäufung zu verhindern ist es, den TowPreg-Strang zeitlich begrenzt in den betreffenden Streckenabschnitten zu durchtrennen. Das Wickelmuster wird also lokal ausgedünnt. Da der durchtrennte Strang aber wieder am Bauteil angelegt werden muss, ist dies nur möglich, wenn das Bauteil mit zwei TowPreg-Strängen (z.B. 2x 12K) gewickelt wird und der durchtrennte Strang wieder vom durchgängigen Strang mitgenommen wird. Im Prozess kann dann, je nach Anforderung, zwischen einem und zwei Strängen beim Abfahren des Musters gewechselt werden. Die Schwierigkeit eines solchen Systems besteht vor allem in dem automatisierten Wiederanlegen des durchtrennten Strangs.

Die Trenn- und Anlegeeinheit besteht aus unterschiedlichen pneumatischen Zylindern, die mittels der jeweiligen Ventile über die zentrale SPS gesteuert werden. Der Prozessablauf ist in Abbildung 4.10 detailliert beschrieben. Dabei steht F für die jeweilige Fadenspannung und S kennzeichnet, ob der Strang zum jeweiligen Zeitpunkt auf dem Fadenträger abgelegt wird. $Z1-Z5$ kennzeichnen die jeweiligen Zylinder mit den dazugehörigen Funktionen. Die Zustände 1 und 0 geben an, ob die Fadenspannung aktiv ist, der Strang am Fadenträger abgelegt wird bzw. ob der Zylinder die Aufgabe ausführt.

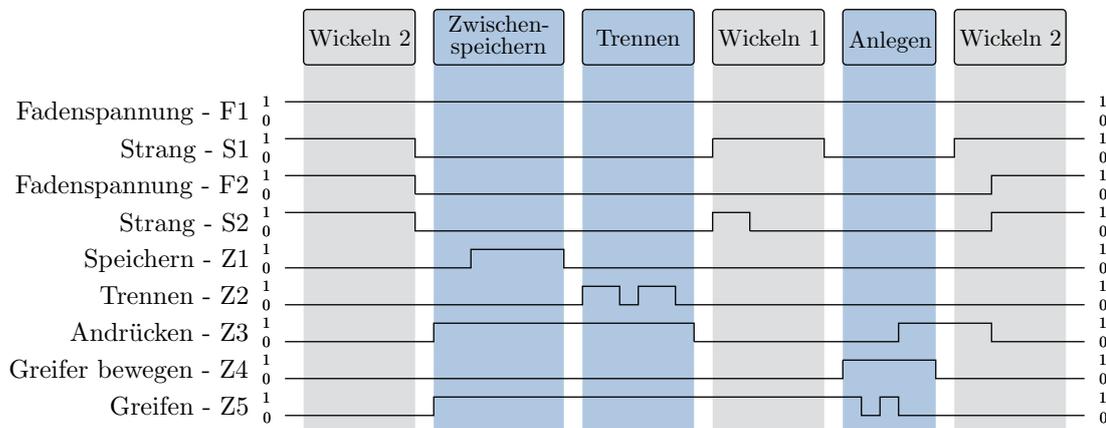


Abb. 4.10: Zeitablaufdiagramm für Trenn- und Anlegeeinheit

Grundvoraussetzung ist, dass der Wickelprozess mit zwei Strängen gestartet wird. Das Grundprinzip dieser Einheit lässt sich wie folgt beschreiben: Während des Wickelprozesses wird der Roboter gestoppt, der TowPreg-Strang 2 wird mit Hilfe des Greifers geklemmt und der Zwischenspeicher damit gefüllt (Zwischenspeichern in Abb. 4.10). Anschließend wird der Strang 2 durchtrennt und der Wickelprozess fährt mit dem Strang 1 und einem Rest des Strangs 2 fort (Wickeln 1 in Abb. 4.10). Zum Wiederanlegen wird der Wickelprozess wieder kurz gestoppt, der durchtrennte Strang 2 wird

an den durchgehenden Strang 1 über den Tack beider Materialien angeheftet. Der Wickelprozess wird fortgeführt, vorerst aber nur mit dem Strang 1 am Fadenträger. In dieser Zeit wird Strang 2 über eine Andrückeinheit solange an den Strang 1 gepresst, bis beide Stränge wieder am Fadenträger sind und der Wickelprozess mit zwei Strängen fortgeführt werden kann.

In Abbildung 4.11 ist ein CAD-Modell der Trenneinheit am Wickelkopf dargestellt. Die Zylinder sind in der offenen Position, Zylinder Z1 nur zur Hälfte, eingestellt. Der Wickelkopf ist, aufgrund der Übersichtlichkeit, ohne weitere Details dargestellt.

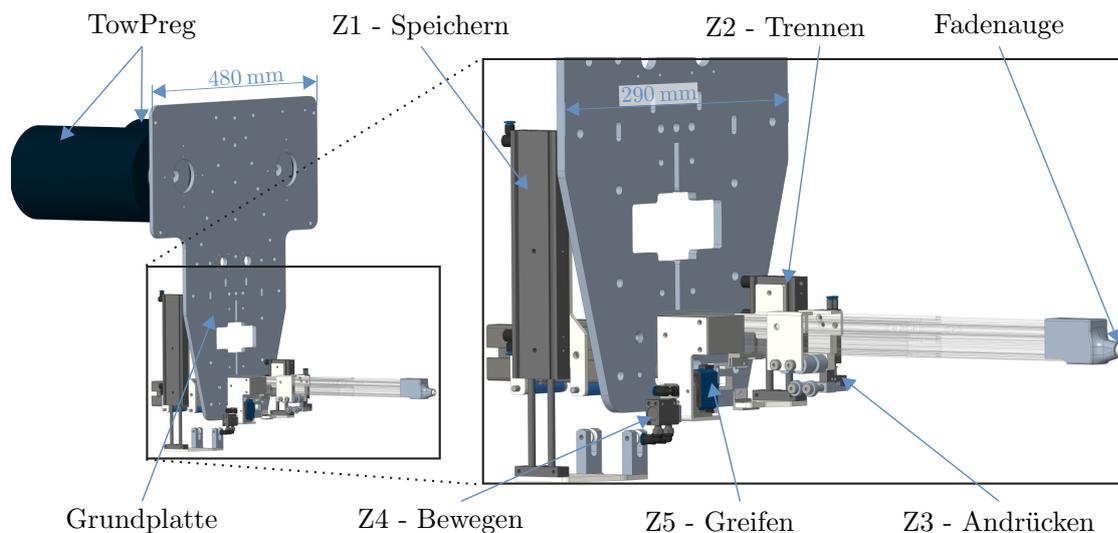


Abb. 4.11: Reduziertes CAD-Modell des Wickelkopfes mit Grundelementen und geöffneten Zylindern der Trenn- und Anlegeeinheit

Dieser Prozess benötigt aktuell ein TowPreg-Material mit relativ hohem Tack, um eine Anhaftung beider Stränge zu realisieren. Mit dem hier verwendeten Material, für die Fertigung des Demonstrators, ist dies aktuell nicht möglich, da der Tack etwas zu niedrig ist.

4.5 Fadenspannungseinfluss

Viele Prozessparameter für das klassische Wickelverfahren wurden bisher in unterschiedlichen Veröffentlichungen untersucht. Diese sind, neben der Fadenspannung, beispielsweise die relative Position des Ablegkopfes bei der Erzeugung eines Wickelmusters und dessen Einfluss auf die Wickelgeschwindigkeit und die Fadenspannung [55, 61] sowie das Durchtrennen einzelner Wickelmuster und dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils [67]. Ebenfalls wurde der Einfluss des Faservolumengehaltes auf die Festigkeit gewickelter Bauteile untersucht. Neben der Fadenspannung wird das FVG auch durch die Wickelzeit beeinflusst, da beim Wickeln mit In-situ Imprägnierung das Harz mit der Zeit aus weiter unter liegende Schichten des Bauteils fließt [118]. Als einer der wichtigsten Parameter im Wickelprozess gilt die Fadenspannung. Für das

klassische Wickelverfahren wurde diese häufig untersucht [42, 52, 67, 69, 118–122]. Die Effekte die dabei ermittelt wurden, insbesondere der Einfluss auf den FVG bei der In-situ Imprägnierung [54, 67] und die Beschädigung der trockenen Fasern [52, 55], spielen für das hier gezeigte Wickeln mit TowPreg eine geringe Rolle. Da die Fasern bereits imprägniert sind und sich das Harz in einem hochviskosen B-Stage befindet, schützt es die Fasern vor Beschädigungen. Der Einfluss der Fadenspannung bei der Verwendung von TowPreg-Material auf die mechanischen Eigenschaften wurde bisher kaum untersucht. Lediglich *Cui et al.* [58] untersuchten diesen Einfluss im Rahmen einer allgemeinen Betrachtung der Fadenspannung. Hier sank die Zugfestigkeit der Probekörper um 25 % und die ILSS nahm um 12 % zu, wenn die Fadenspannung beim Wickeln von 29 N auf 90 N angehoben wurde.

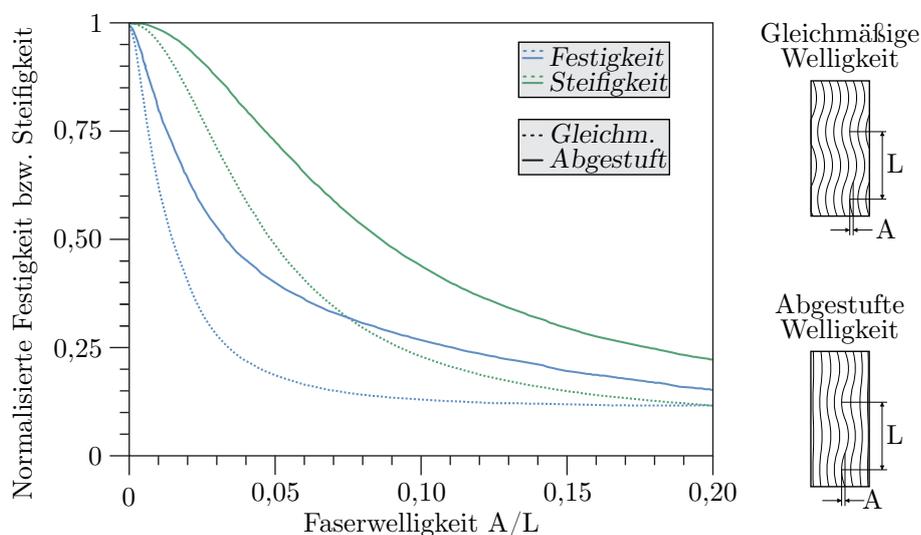


Abb. 4.12: Einfluss der Faserwelligkeit auf die normalisierte Druckfestigkeit und -steifigkeit nach [123, 124].

Beim Wickeln mit TowPreg wird der Haupteinfluss der Fadenspannung, auf die mechanischen Eigenschaften, bei der Vermeidung von Ondulationen vermutet. Diese Ondulationen wirken sich negativ auf die Festigkeit und Steifigkeit aus (Abb. 4.12). In der Theorie werden bei einer zu niedrigen Fadenspannung, oder auch bei kleinen Wickelradien, die einzelnen Fasern im TowPreg-Strang nicht parallel zu einander und parallel zur gewünschten Probengeometrie abgelegt. Dadurch werden einzelne Bereiche des TowPreg-Strangs nicht in 0° -Faserrichtung, sondern mit einer gewissen Abweichung dazu belastet. Die so entstehenden Ondulationen haben einen hohen Einfluss auf die faserparallele Festigkeit und Steifigkeit des Bauteils, sowohl bei Zug-, als auch bei Druckbelastungen [125].

Bei solchen Abweichungen wird die Festigkeit stärker als die Steifigkeit beeinflusst [44]. Bei einer Druckbelastung führen schon sehr kleine Ondulationen zu einer sehr hohen Abnahme der Druckfestigkeit, wohingegen die Drucksteifigkeit erst bei etwas höheren Ondulationen anfängt abzusinken (siehe Abbildung 4.12) [124].

Da nur geringe Abweichungen im Faserwinkel durch eine suboptimale Fadenspannung erwartet werden, soll die Druckfestigkeit als Parameter für den Fadenspannungseinfluss

genutzt werden. Dieser Wert reagiert sehr sensitiv auf Winkeländerungen. Schon bei geringen Welligkeiten von $A/L = 0,01$ sinkt, bei gleichmäßiger Welligkeit, die Druckfestigkeit um ca. 38 %. Bei einer abgestuften Welligkeit, wie bei einer zu niedrigen Fadenspannung zu erwarten, sinkt diese um ca. 20 % (Abb. 4.12).

4.5.1 In-situ Druckproben-Wickelwerkzeug

Der Einfluss der Fadenspannung auf die mechanischen Eigenschaften soll aufgrund der eben genannten Gründe mit Hilfe der Druckfestigkeit untersucht werden. Die Ermittlung der Druckfestigkeit soll in Anlehnung an die *DIN EN ISO 14126* erfolgen, die die Ermittlung der Druckeigenschaften in der Laminebene festlegt [126]. Die Probengeometrie vom Typ A hat die Abmessungen 110x10x2 mm (Länge x Breite x Dicke). Die Aufleimer sind 50x10x1 mm (Länge x Breite x Dicke) groß. Da die Probekörper klassischerweise aus flächigen Ausgangsmaterialien (z.B. PrePreg) hergestellt werden, sollen als Ausgangspunkt für die Herstellung der Probekörper rechteckige, flächige Tafeln gefertigt werden. Im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren ist so eine Plattenherstellung zwar möglich, bringt aber einige Nachteile mit sich. Es muss berücksichtigt werden, dass bei der Verwendung des schmalen TowPreg-Materials eine gewisse seitliche Überlappung der Stränge vorhanden ist, um eine geschlossene, flächige Platte herzustellen. Auch ist die Umlenkung des TowPreg-Materials an der Wickelkante des Plattenwerkzeuges, wegen möglicher Beschädigungen, nicht unproblematisch. Beim Aushärten der Platte muss darauf geachtet werden, dass es durch die Fadenspannung im Wickelverfahren nach dem Aushärtvorgang nicht zu einer Verformung der Platte kommt und diese sich verkrümmt. Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass beim Zuschneiden der rechteckigen Proben aus der Wickelplatte der Zuschnitt parallel zur Faserrichtung erfolgt. Das Aufbringen der Aufleimer nach dem Zuschnitt ist zusätzlich ein zeitintensiver Prozess. All diese Nachteile wurden in einer betreuten studentischen Arbeit ermittelt und sollen hier, so weit wie möglich, umgangen werden [127].

Es soll ein Werkzeug konstruiert werden, mit Hilfe dessen es möglich ist, Endkontur-Probekörper mit einer In-situ Befestigung der Aufleimer zu fertigen. Dadurch ist eine exakte, parallele 0° Anordnung der Fasern zur Probengeometrie gegeben. Es kann also zu keinen Abweichungen bei der Orientierung des Faserwinkels kommen. Des Weiteren entfällt ein nachträgliches Ausschneiden der Probekörper, wie etwa beim Wasserstahlschneiden. Zusätzlich werden die Aufleimer im Wickelprozess eingelegt und zusammen mit dem FKV-Material ausgehärtet. Das Matrix-Material dient hierbei als Ersatz für einen normalerweise zu nutzenden Klebstoff. Dadurch entfällt das nachträgliche und zeitaufwendige Anbringen der Aufleimer. Das Grundprinzip des Werkzeuges kann auch auf andere Probekörpergeometrien, wie etwa dem Zugversuch, angewendet werden. In Abbildung 4.13 ist der Aufbau des Werkzeuges zu sehen.

An den Grundkörper wird die Aufnahme für die Wickelachse, sowie der Startblock geschraubt. Am Startblock wird das TowPreg zu Beginn des Wickelversuches befestigt, damit die erste Bahn bereits mit definierter Fadenspannung gewickelt werden kann. Im Grundkörper werden fünf Einleger verschraubt, die die Aufleimer aufnehmen und

den zu testenden Mittelbereich der Druckprobe festlegen. Auf die Grundkörper werden die Aufleimer vor dem Wickelbeginn verschraubt, damit diese während des Wickelns nicht herausfallen. Die Verschraubung der Aufleimer muss nach dem Wickeln und vor dem Aushärten entfernt werden. Jetzt können mit Hilfe eines durchgehenden TowPreg-Stranges alle fünf Probekörper am Stück gewickelt werden. Die Fadenspannung wird dabei über eine Charge (fünf Probekörper) konstant gehalten. Im Anschluss daran werden die oberen Aufleimer aufgelegt und der Stempel montiert. Der Stempel wird leicht fixiert und die Probekörper werden an den Enden durchtrennt, sodass fünf einzelne Probekörper entstehen. Die Aufnahme und der Startblock werden entfernt und die Proben können nun unter Temperatur und Druck ausgehärtet werden.

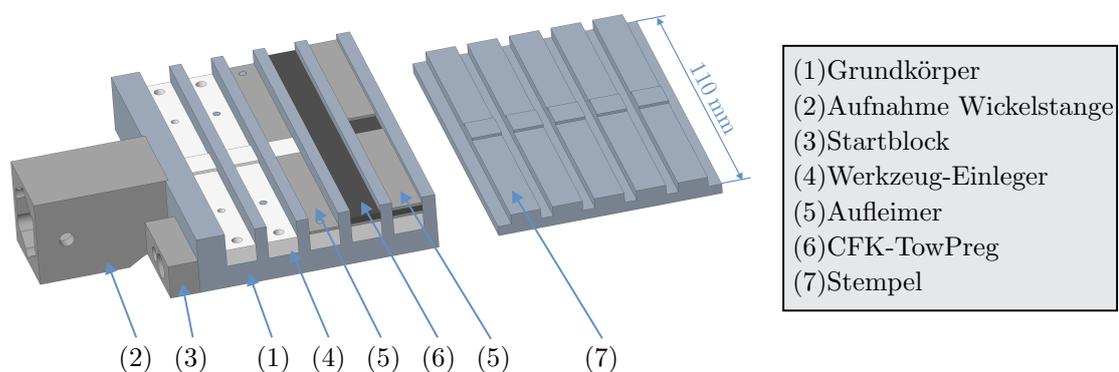


Abb. 4.13: Neuartiges Wickelwerkzeug für die In-situ Fertigung von Druckprobekörpern im Faserwickel-Verfahren.

Falls es nicht möglich ist, die unteren Aufleimer mit einem Gewinde zu versehen, können diese auch Schritt-für-Schritt im Wickelvorgang eingelegt werden. Eine andere Variante besteht darin, die oberen Aufleimer mit einem Gewinde zu versehen, sodass diese bereits mit dem Stempel verschraubt sind. Dabei muss allerdings auf die exakte Montage geachtet werden, damit sich die Aufleimer nicht verdrehen und der Stempel somit nicht montiert werden kann. Ebenfalls kann der Grundkörper auch beidseitig ausgeführt werden oder durch zusätzliche Probekanäle erweitert werden, was die Effizienz der Probekörperherstellung noch erhöhen würde. In Abbildung 4.14 ist das Werkzeug samt gewickelter CFK-Proben dargestellt.

Die Kompatibilität der thermischen Ausdehnung muss beim Aufleimer-Material aufgrund der In-situ-Aushärtung (unter Wärme) der CFK-Proben und des Aufleimers berücksichtigt werden. Somit eignen sich Aluminium-Aufleimer nicht, was in Versuchen auch bestätigt werden konnte. Aufgrund des hohen Unterschiedes im Wärmeausdehnungskoeffizienten ($\alpha_{Al} \approx 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ vs. $\alpha_{CFK} \approx 0 \text{ K}^{-1}$) kommt es beim Abkühlen zu einer Relativverschiebung, welche in einer zu hohen mechanischen Beanspruchung der Verbindungsschicht führt (Delta-Alpha-Problem) [128]. Dadurch lösen sich die Aluminium-Aufleimer nach dem Abkühlen wieder vom CFK. In der relevanten Norm werden GFK-Aufleimer mit einer $\pm 45^\circ$ Ausrichtung der Fasern zur Probenlängsachse empfohlen. Da die Aufleimer aber mit einem Gewinde versehen werden sollen, ist die Nutzung von GFK nicht empfehlenswert. Aus den oben genann-

ten Gründen werden die Aufleimer aus Titan (Ti) gefertigt, da diese die von der Norm geforderte höhere Festigkeit, im Vergleich zu den GFK-Aufleimern, aufweisen und gleichzeitig eine signifikant geringere Wärmeausdehnung ($\alpha_{Ti} \approx 8,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) als Aluminium ($\alpha_{Al} \approx 24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) besitzen.

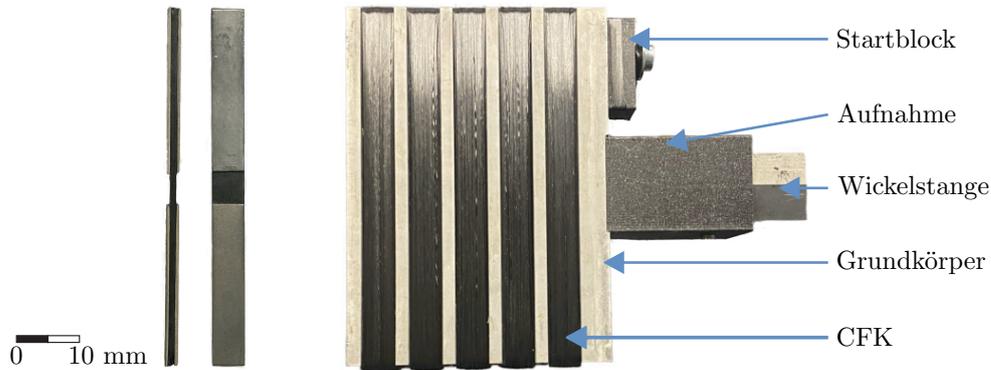


Abb. 4.14: Foto mit zwei Ansichten eines gewickelten Druckprobekörpers (links) und des neuartigen Wickelwerkzeugs für die In-situ Fertigung von eben solchen Druckprobekörpern (rechts).

4.5.2 Charakterisierung des Materials für die Druckversuche

Für die hier durchgeführten Druckversuche, zur Ermittlung des Fadenspannungseinflusses, wird ein TowPreg der Firma *TCR Composites* genutzt. Dieses besteht aus einem 12K T700 Kohlenstofffaserfilament der Firma *Toray Industries* und dem Epoxidharz-Matrixsystem UF3376 der Firma *TCR Composites*. Die genaue Bezeichnung des Materials ist in Tabelle 3.1 aufgeführt. Für das TowPreg-Material gibt es im Datenblatt nur Kennwerte für das Matrix-Material selbst, oder in Kombination mit einem 24K T800 Kohlenstofffaserfilament, nicht aber mit dem hier verwendeten 12K T700 Filament [129]. Für die Überprüfung der Materialqualität und der Generierung erster Materialkennwerte, werden Zugversuche an Probekörpern nach DIN EN ISO 527-5 durchgeführt (Tabelle 4.1) [127].

Tab. 4.1: Ermittelte Zugfestigkeitskennwert des TowPreg Materials (UF3376-T700) nach [127].

	Datenblatt	Gemessen Typ B
$R_{ }^+$ [MPa]	-	2205,0 ± 113

Aus Referenzgründen, zu bisher ermittelten Kennwerten anderer FKV im Labor, wird abweichend von der Norm, die faserparallele Festigkeit des Materials mit Probekörpern vom Typ B ermittelt [130]. Die Steifigkeit konnte nicht ermittelt werden. Für den Versuch wurden Platten im Wickelverfahren mit einer Dicke von 2 mm (Typ B) hergestellt

und unter Vakuum bei 121 °C für 4 Stunden ausgehärtet. Die Probekörper wurden im Anschluss mittels Wasserstrahlschneidens zugeschnitten und geprüft [127]. Bei einer Probekörperbreite von $b = 25,0 \pm 0,03$ mm und einer Dicke von $t = 2,0 \pm 0,01$ mm konnte die in Tabelle 4.1 ermittelte, faserparallele Zugfestigkeit bestimmt werden.

4.5.3 Fertigung der Druckprobekörper

Für das hier verwendete Material werden pro Probe 6 Lagen à 4 Stränge in der Breite und eine Endlage mit 2 Strängen benötigt, um die geforderten 2 mm Probendicke zu erreichen. Die 4 Stränge in der Breite überlappen leicht. Die Proben werden bei 110 °C für 6 Stunden unter Vakuum ausgehärtet. Es wird eine Aufheizrampe von 2,8 °C/min genutzt. Nach dem Aushärten bleibt das Werkzeug für weitere 30 Minuten bei Raumtemperatur unter Druck, zum Abkühlen, bevor die Probekörper entformt werden. Die Probekörper werden vermessen und von überschüssigen Harzresten befreit. Die Schnittkanten an der Stirnseite müssen nach dem Aushärten noch bearbeitet werden, damit eine ebene Fläche entsteht.

Die Aufleimer werden händisch aus Titan-Streifen, mit den Abmessungen 250x10x1 mm und der Legierung 3.7025, hergestellt. Im ersten Schritt werden die Streifen gereinigt und die Oberfläche mittels Sandstrahlen aufgeraut, damit eine besser Anhaftung gewährleistet wird. Anschließend müssen diese der Länge nach auf die geforderten 50 mm gekürzt werden. Damit die Aufleimer passend im eng tolerierten Werkzeug montiert werden können, werden diese am Ende noch händisch am Schleifband eingepasst. Aufgrund der händischen Bearbeitung war es nicht möglich, die unteren Aufleimer mit dem Werkzeug zu verschrauben. Deshalb wurde die zweite Variante gewählt, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, bei der die Aufleimer händisch im Wickelprozess nacheinander eingelegt werden. Es wird allerdings empfohlen, die Aufleimer maschinell anfertigen zu lassen, was aufgrund des Titanmaterials mit etwas höheren Anschaffungskosten verbunden ist.

In Tabelle 4.2 sind die gefertigten Probekörperchargen mit eingestellter und gemessener Fadenspannung, so wie der dazugehörigen Testreihe angegeben. Bei jeder Charge werden, entsprechend dem neuen Wickelwerkzeug, fünf Probekörper gefertigt. Aufgrund eines vorhandenen Offset im Fadenspannungssystem ist die gemessene Fadenspannung F_{ist} um ca. 5 N niedriger als die eingestellte Fadenspannung F_{soll} .

Für die erste Versuchsreihe wird eine sehr niedrige Fadenspannung ($F_{soll} = 30$ N), eine mittlere Fadenspannung ($F_{soll} = 60$ N), sowie eine hohe Fadenspannung ($F_{soll} = 80$ N) genutzt. Die hohe Fadenspannung sollte eigentlich bei 90 N liegen, als Vergleich zur Veröffentlichung von Cui et al. [58], allerdings ist es nicht möglich bei dieser Fadenspannung Probekörper zu wickeln. Aufgrund des 12K Filaments und der Kanten am Wickelwerkzeug, reißt der TowPreg-Strang beim Wickelvorgang. Der Wert der niedrigen Fadenspannung wurde so gewählt, dass dieser etwas über der, zur Überwindung der Reibung im System benötigten, minimalen Abzugskraft liegt.

Für die zweite Versuchsreihe wird die minimale Fadenspannung noch niedriger angesetzt ($F_{soll} = 25$ N) um eine Ondulation der Fasern zu provozieren. Bei einem solch

Tab. 4.2: Übersicht der gefertigten Probekörper für die zwei Testreihen der Druckversuche inkl. der eingestellten und gemessenen Fadenspannung.

Charge	F_{soll} [N]	F_{ist} [N]	Versuch
a	30	$26,4 \pm 2,3$	
b			
c	60	$55,2 \pm 3,2$	1
d			
e	80	$74,5 \pm 3,3$	
f			
h	25	$19,2 \pm 1,9$	
i			
j	47,5	$43,0 \pm 2,7$	2
k			
l	70	$65,1 \pm 3,4$	
m			

niedrigen Wert wird in der Realität eigentlich nicht gewickelt und das Fadenspannungssystem ist quasi nicht im Einsatz. Da die Probenfertigung mit $F_{soll} = 80$ N aufgrund der hohen Fadenspannung sehr aufwendig durchzuführen war, wird als neuer oberer Wert, der zweiten Versuchsreihe, $F_{soll} = 70$ N gewählt. Als mittlerer Wert wird dementsprechend $F_{soll} = 47,5$ N gewählt und als Referenz, zum Vergleichen mit der ersten Versuchsreihe, $F_{soll} = 60$ N.

4.5.4 Versuchsdurchführung

Für den Druckversuch werden zwei Testreihen im Shear-Loading Verfahren, nach *DIN EN ISO 14126*, durchgeführt. Dabei werden die Druckkräfte mittels Scherung über die Aufleimer eingebracht. Eine Messung im Combined-Loading Verfahren, bei dem die Krafteinleitung zusätzlich über die Stirnfläche erfolgt, kann nicht durchgeführt werden. Dies liegt am neuartigen Herstellungsverfahren der Probekörper, wodurch die benötigte Genauigkeit bei der Parallelität der Enden der Probekörper, trotz der Nachbearbeitung, nicht erreicht werden konnte. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt die laut obiger Norm vorgeschriebenen 1 mm/min.

Die erste Testreihe wird auf einer angepassten Universalprüfmaschine (*Schenk*) mit mechanischen Klemmbacken und einer kugelgelagerten Führung durchgeführt. Die Proben werden händisch ausgerichtet und die Klemmbacken händisch verschlossen. Die Verformung wird mit Hilfe eines parallelschneidenden Laserextensometers (*Fiedler PS-E50*) gemessen. Um ein Ausknicken der Probekörper zu überprüfen, werden die Versuche mit Hilfe einer Kamera (*GoPro HERO7 Black*) aufgezeichnet, die seitlich auf die Probekörper gerichtet ist.

Die Zweite Testreihe wird auf einer Universalprüfmaschine (*ZwickRoell Z250*) mit hydraulischen Klemmbacken durchgeführt. Dafür wird eine spezielle hydraulische Druckvorrichtung (HCCF) für die Verwendung mit Verbundwerkstoffen genutzt. Diese Druckvorrichtung ermöglicht eine sehr genaue Ausrichtung der Probekörper und eine präzise Führung der beiden Probenhalter [131]. Der Klemmdruck wird händisch auf 80 bzw. 100 bar eingestellt. Die Verformung wird mit Hilfe der digitalen Bildkorrelation (DIC) mittels *VIC-2D* von *Correlated Solutions* gemessen. Diese dient gleichzeitig auch dafür, ein Knicken der Proben auszuschließen (Dehnungsmessung an den seitlichen Flächen). Das Kamerasystem (*Basler acA4096-40um*) ist so platziert, dass es senkrecht die seitliche Fläche der Probe aufnimmt (Abbildung 4.15). Damit eine DIC-Messung möglich ist, werden die Probekörper vor der Messung mit einem schwarz-weißen Zufallsmuster auf der Messfläche versehen. Pro Sekunde werden im Versuch drei Bilder aufgenommen.

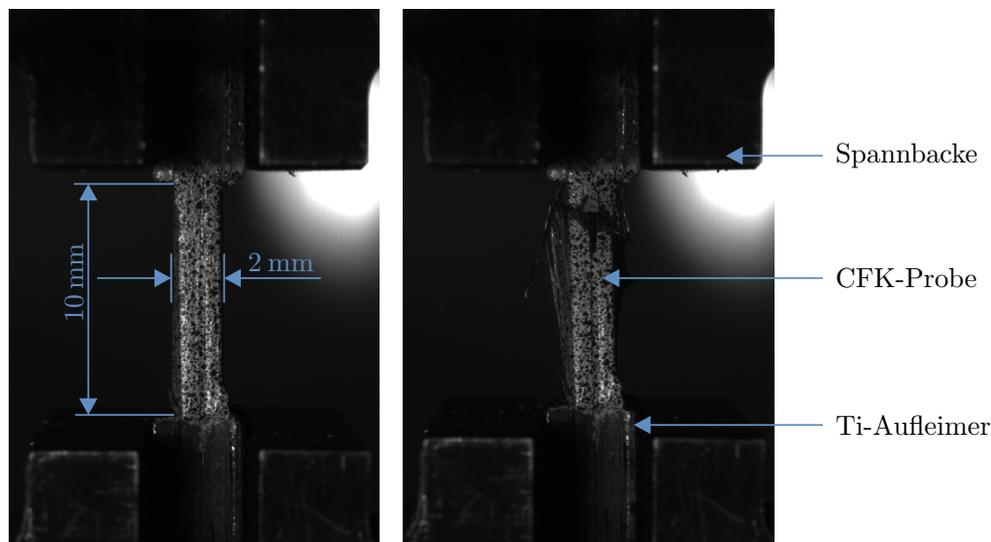


Abb. 4.15: Aufnahme eines CFK-Probekörpers (j3) in der HCCF-Vorrichtung zu Beginn (links) und Ende (rechts) des Versuches.

4.5.5 Ergebnisse zum Fadenspannungseinfluss

Anhand des Videomaterials der Kamera, kann für die erste Testreihe eine unzulässige Biegung bei insgesamt vier Proben festgestellt werden. Insgesamt sind 21 von 30 Proben gültig. Bei einer dieser Proben gibt es ein Versagen der Anbindung am Aufleimer, eine Probe kann aufgrund eines zu kleinen Aufleimers nicht getestet werden und bei zwei Aufleimern gibt es eine unzulässige Dickenscherung im Bereich des Aufleimers.

Für die Zweite Versuchsreihe erfolgt die Ermittlung der Dehnung mit drei virtuellen Dehnmessstreifen (DMS), die auf der seitlichen Fläche platziert sind. Einmal mittig, für die Auswertung der Steifigkeit des Probekörpers sowie jeweils einmal seitlich davon, für den Ausschluss eines ungültigen Knickens des Probekörpers. Mit Hilfe dieser Daten können die Versuche ausgewertet werden. Dabei kann ein unzulässiger Bruch durch Biegung der Probekörper anhand der Norm, mit Hilfe der Bedingung in Gleichung 4.1,

ausgeschlossen werden [126]. ε_{11a} beschreibt dabei die Stauchung in Faserrichtung des einen DMS, ε_{11b} des anderen. Bei dieser Versuchsreihe sind 21 von 30 Proben gültig, wobei alle 9 ungültigen an der Anbindung zwischen CFK und Aufleimer versagten.

$$\left| \frac{\varepsilon_{11b} - \varepsilon_{11a}}{\varepsilon_{11b} + \varepsilon_{11a}} \right| \leq 0,1 \quad (4.1)$$

In Abbildung 4.16 sind die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen zu sehen. Für die bessere Vergleichbarkeit sind beide Versuchsreihen in einem Diagramm mit Hilfe des arithmetischen Mittelwertes und der Standardabweichung dargestellt. In Versuchsreihe 1 nimmt die Druckfestigkeit mit steigender Fadenspannung leicht zu (6,5 % von 30 N auf 80 N). Aufgrund der hohen Schwankungen der Messreihen kann jedoch nicht von einem eindeutigen Zusammenhang ausgegangen werden. Dies spiegelt sich auch in der Messung der Steifigkeit wieder. Im Gegensatz zur Festigkeit nimmt diese von 30 N auf 60 N leicht zu, um dann von 60 N auf 80 N wieder unter den ermittelten Wert von 30 N zu fallen. Somit kann in der ersten Versuchsreihe kein Zusammenhang zwischen der Fadenspannung und der Druckfestigkeit und -steifigkeit nachgewiesen werden.

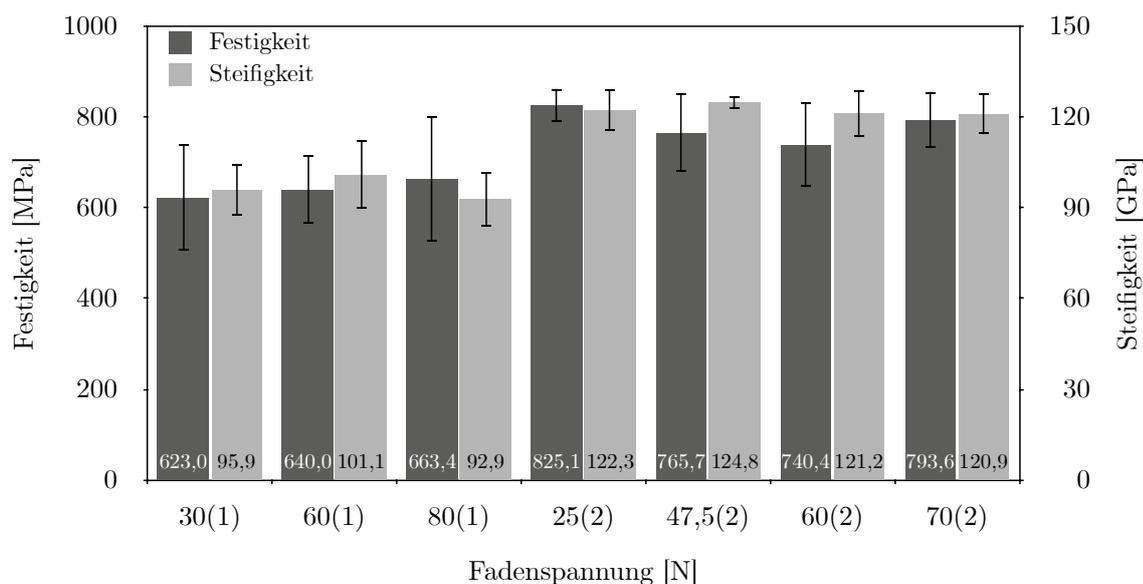


Abb. 4.16: Ergebnisse der Druckversuche beider Versuchsreihen (1) & (2), mit Mittelwert und Standardabweichung für die faserparallele Druckfestigkeit & -steifigkeit.

Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe liegen bei jedem ermittelten Wert oberhalb der Versuche aus Messreihe eins, unabhängig von der Fadenspannung. So ist im Mittel, über alle Fadenspannungen, die ermittelte Druckfestigkeit um ca. 24 % und der E-Modul um ca. 26 % höher. Vergleicht man die Werte bei der identischen Fadenspannung von 60 N ist auch hier die ermittelte Druckfestigkeit um ca. 16 % höher und der E-Modul um ca. 20 %.

In der zweiten Versuchsreihe sind die Standardabweichungen niedriger. Die Festigkeit nimmt hier, im Gegensatz zum ersten Versuch, mit höherer Fadenspannung ab, um

dann am Ende sprunghaft von 60 N bis 70 N wieder anzusteigen. Dabei ist die höchste Festigkeit, bei der niedrigsten Fadenspannung zu sehen. Der E-Modul bleibt bei allen Versuchen auf einem nahezu konstanten Wert. Trotz geringerer Abweichungen als im ersten Versuch, sind die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe nicht schlüssig.

Bei beiden Versuchsreihen stimmen die Ergebnisse nicht mit der aufgestellten Annahme überein, dass eine höhere Fadenspannung zu höheren Druckfestigkeiten führt. Dies könnte zwei mögliche Hauptursachen haben. Zum einen kann dies bedeuten, dass die Fadenspannung, in dem hier betrachteten Wertebereich, beim Wickeln mit TowPreg-Material keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit des Probekörpers und damit auch vermutlich auf die Bauteilfestigkeit hat. Eine andere, wahrscheinlichere Möglichkeit ist, dass weitere Effekte bei der Herstellung der Probekörper, den Einfluss der Fadenspannung überlagern. Beispielsweise müssen die Probekörper nach dem Wickeln und vor dem Aushärten durchtrennt werden, sowohl bei dem hier vorgestellten Werkzeug, wie auch bei der klassischen Fertigung über eine gewickelte Platte. Dies kann dazu führen, dass es dadurch zu einem Abbau der aufgebauten Vorspannung in der unausgehärteten Probe kommt und alle Probekörper in einem ähnlichen Zustand ausgehärtet werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Kompaktierung der Probekörper mittels Vakuum. Durch den geringen Unterdruck von ca. -0,93 bar ist es möglich, dass die nicht optimale Konsolidierung der Proben im Vergleich zur Nutzung eines Autoklavs mit höheren Drücken, zu gleichmäßig niedrigen Werten führt. Auch liegen die Werte der Druckfestigkeit beider Versuchsreihen weit unter den erwarteten Werten aus unterschiedlichen TowPreg-Datenblätter mit einer 12K T700-Faser. Die Druckfestigkeit sollte eigentlich im Bereich von $R_{||}^- \approx 1400 - 1600$ MPa, ermittelt nach der Norm *SACMA SRM 1R-94*, liegen.

4.6 Wickelmuster

Mit Hilfe von Wickelmustern ist es möglich, die mechanischen Eigenschaften von gewickelten Bauteilen gezielt und variabel einzustellen [63]. Über unterschiedliche Wickelmuster kann das Bauteil in verschiedenen Bereichen gezielt mit Material, in bestimmter Orientierung, versehen werden (ähnlich einem Lagenaufbau bei andern FKV-Herstellungsverfahren). Dabei besteht das Gesamtlaminat des Bauteils aus der Summe der einzelnen, abgelegten Wickelmustern. Ein weiterer Vorteil durch die Nutzung von Wickelmustern ist die Verringerung des Programmieraufwandes im roboterbasierten 3D-Wickelfahren. Durch die endliche Begrenzung und Auswahl von Wickelmustern kann der Roboter mit wenigen unterschiedlichen Mustern, komplexe Geometrien erzeugen.

Entscheidend ist hierbei die Definition und Erzeugung der möglichen Wickelmuster für ein Bauteil. Liegt, wie hier in dieser Arbeit, ein topologieoptimiertes, fachwerkartiges Bauteil vor, werden die Wickelmuster entlang dieser lasttragenden Strukturen orientiert. Liegt ein Bauteil mit flächigen Strukturen vor, werden diese, wie im klassischen Wickelfahren, über die globale Faserorientierung, abgebildet [63]. Hierbei wird das Erstellen von optimierten Wickelmustern allerdings erschwert, da eine klare Begren-

zung der Wickelpfade über die Geometrie, wie bei fachwerkartigen Bauteilen, nicht so einfach möglich ist. Auch dies ist ein Grund für die spätere Hybridisierung in dieser Arbeit. Die fachwerkartigen Strukturen können eindeutig in lasttragende Wickelmuster zerlegt werden und flächige Bereiche können mit Hilfe des Spritzgussmaterials abgebildet werden. Für die Generierung der Wickelmuster werden deshalb in dieser Arbeit nur fachwerkartige Strukturen betrachtet.

4.6.1 Bauteileinteilung

Für die Erzeugung von Wickelmustern muss im ersten Schritt das zu wickelnde Bauteil in einzelne Bereiche aufgeteilt werden. Einen Anhaltspunkt hierfür gewinnt man aus der Übertragung der Graphentheorie, einem Bereich der diskreten Mathematik. Auch andere Verfahren sind theoretisch möglich, werden hier aber nicht weiter betrachtet. In der Graphentheorie wird eine Problemstellung anhand eines sogenannten Graphen G abstrahiert. Folgende Definition kann für einen Graph in Anlehnung an *Diestel* [132] und *Mönius* et al. [133] genutzt werden:

Ein Graph $G = (V, E)$ ist durch eine Menge $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_i, \dots\}$ von Ecken und eine Menge $E = \{\{v_1, v_2\}, \{v_2, v_3\}, \dots, \{v_{i-1}, v_i\}, \dots\}$ von Kanten definiert.

Dabei werden Ecken als Punkte und Kanten als Linien gezeichnet. Eine Kante verbindet dabei immer zwei Ecken miteinander (ausgenommen eine Schleife, bei der eine Ecke mit sich selbst verbunden ist). Es ist dabei freigestellt, ob die Kanten als Geraden, in Kurven oder überkreuzend gezeichnet werden. Graphen können entweder gerichtet (Kanten werden mit Pfeilen dargestellt und haben somit eine angegebene Richtung) oder ungerichtet (ohne Pfeile) dargestellt werden [132]. Mehrfachkanten bezeichnen mehrere parallele Kanten zwischen zwei Ecken und treten in Multigraphen auf [132]. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur schlichte Graphen, also ohne Schleifen, Mehrfachkanten und gerichtete Kanten, betrachtet.

In Abbildung 4.17 sind zwei Beispiele für schlichte Graphen dargestellt. Einmal ein vollständiger Graph K^5 (mit K^n Ecken), bei dem alle Ecken untereinander, paarweise verbunden sind und ein Kreisgraph C^5 (mit C^n Ecken), bei dem Start- und End-Ecke identisch sind.

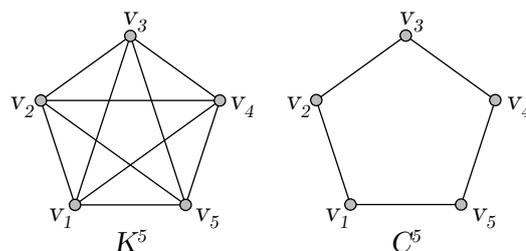


Abb. 4.17: Darstellung zweier Graphen mit jeweils 5 Ecken; vollständiger Graph K^5 (links) und Kreisgraph C^5 (rechts) nach [134].

Mit der Graphentheorie können nun unterschiedliche Probleme und Optimierungen gelöst werden, wie etwa das *Königsberger Brückenproblem*, bei dem ein Rundweg durch Königsberg gesucht wird, bei dem jede der sieben historischen Brücken genau einmal überschritten wird. Dieses Problem wurde von *Leonhard Euler* mit Hilfe der Euler-Kreise bewiesen, auf welche später noch kurz eingegangen wird. Tiefere Ausführungen zur Graphentheorie sind in weiterführender Literatur, wie etwa [132–134] zu finden.

Mit Hilfe der Graphentheorie kann ein zu wickelndes Bauteil in einzelne Ecken und Kanten eingeteilt werden. Anhand des hier betrachteten Brakeboosters, kann dies wie folgt, in 12 Ecken und 18 Kanten geschehen (siehe Abbildung 4.18). Dabei ist die Platzierung der Ecken, je nach Bauteilgeometrie, teilweise nicht eindeutig durchführbar. Des Weiteren sollten symmetrische Bauteilbedingungen beim späteren Erstellen der Basis-Wickelmuster ausgenutzt werden.

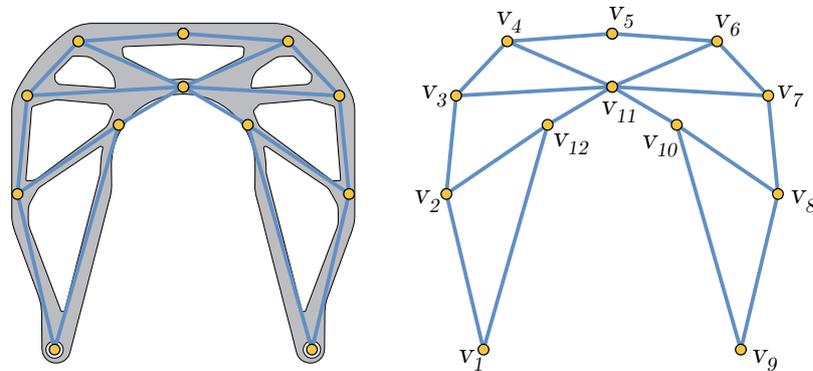


Abb. 4.18: Darstellung des Brakeboosters, aufgeteilt in Ecken und Kanten (links) sowie als Graph mit Benennung der Ecken (rechts).

4.6.2 Generierung von Basis-Wickelmustern

Durch die Einteilung des Bauteils in Ecken und Kanten sollen nun Basis-Wickelmuster erzeugt werden. Der Begriff Wickelmuster beschreibt allgemein Muster, also Abfolgen in der Materialablage, ohne weitere Randbedingungen, die im Wickelprozess genutzt werden können. Als Basis-Wickelmuster werden in dieser Arbeit Wickelmuster bezeichnet, welche als Grundbaustein für die Erzeugung des Wickelplans genutzt werden. Diese Basis-Wickelmuster dürfen auf der einen Seite nicht zu komplex und zu groß sein, um eine gezielte Verstärkung des Lagenaufbaus zu ermöglichen (Abb. 4.19 links). Auf der anderen Seite dürfen sie nicht zu simpel und feingliedrig sein, damit bei einer Durchmischung der Muster eine Lastübertragung mit anderen Mustern noch möglich ist (Abb. 4.19 rechts). Auch sollen alle Basis-Wickelmuster einen vollständigen Zyklus ergeben, was bedeutet, dass das jeweilige Muster an der gleichen Ecke anfängt und endet. Dies ermöglicht ein einfacheres Erstellen eines Wickelplans. Um dies zu erzielen gibt es mehrere Möglichkeiten, welche im Folgenden beschrieben werden.

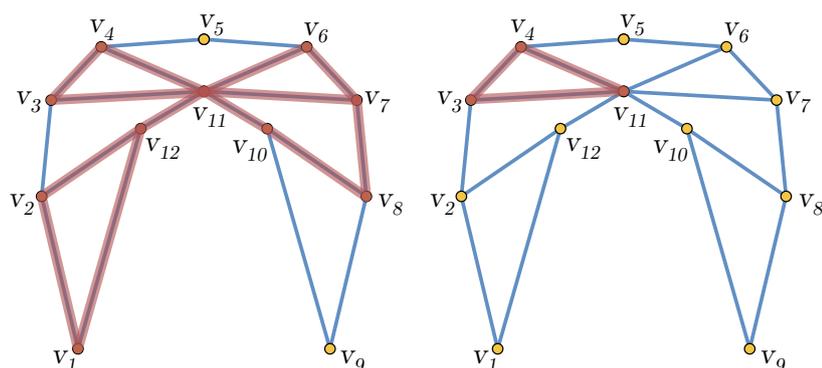


Abb. 4.19: Negativbeispiele für Basis-Wickelmuster anhand des Brakeboosters; zu komplex und groß (links) sowie zu feingliedrig (rechts).

Da das Bauteil in einzelne Kanten und Ecken aufgeteilt wurde, bieten sich für die Erstellung besagter Basis-Wickelmuster Methoden aus der Graphentheorie an. Eine Möglichkeit hierfür kann in Anlehnung an sogenannte Hamilton-Kreise erfolgen. Hamilton-Kreise beschreiben einen Pfad im Graphen, bei dem alle Ecken nur einmal überfahren werden. Übertragen auf ein Basis-Wickelmuster, kann als Randbedingung gesetzt werden, dass ein Basis-Wickelmuster immer nur einmal über unterschiedliche Ecken laufen darf. Dadurch entstehen Wickelmuster, wie beispielsweise in Abbildung 4.20 dargestellt.

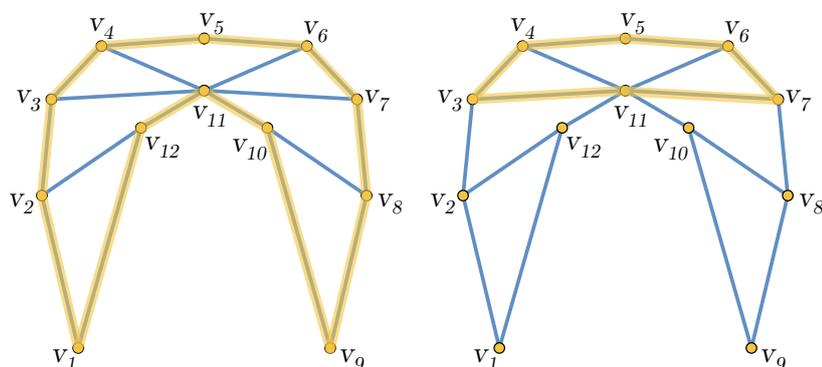


Abb. 4.20: Beispielhafte Generierung von Basis-Wickelmustern, welche ausgewählte Ecken nur einmalig überfahren (in Anlehnung an sogenannte Hamilton-Kreise).

Diese Vorgehensweise erweist sich allerdings als nicht zielführend, da einige potenzielle Wickelmuster (siehe Abbildung 4.21) nicht abgebildet werden können. Diese Wickelmuster sollten aber, mit Hinblick auf den Kraftfluss im Bauteil, nicht vernachlässigt werden.

Um zusätzlich zu den bereits gezeigten Mustern, auch Muster aus dem Schema nach Abbildung 4.21 abbilden zu können, kann auf eine andere Methode aus der Graphentheorie zurückgegriffen werden. Ein sogenannter Euler-Kreis beschreibt einen Pfad in einem Graphen, in dem alle Kanten genau einmal überfahren werden. In Anlehnung daran könnten alle Basis-Wickelmuster nur aus Zyklen bestehen, bei dem jede Kante genau einmal überfahren wird.

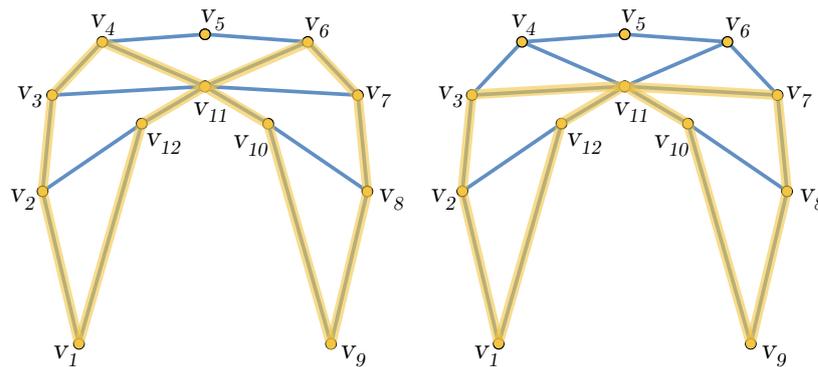


Abb. 4.21: Beispielhafte Generierung von Basis-Wickelmustern, welche ausgewählte Kanten nur einmalig überfahren, die Ecke v_{11} aber mehrmals passieren (in Anlehnung an sogenannte Euler-Kreise).

Allerdings schließt diese Methode das Wickelmuster in Abbildung 4.22 aus, welches aus Sicht des Kraftflusses ebenfalls nicht vernachlässigt werden sollte.

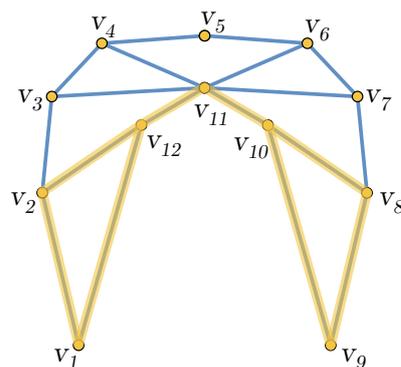


Abb. 4.22: Beispielhafte Generierung eines Basis-Wickelmusters, bei dem bei identischer Start- und End-Ecke die Kanten $\{v_{10}, v_{11}\}$ und $\{v_{11}, v_{12}\}$ mehrmals überfahren werden müssen.

Damit alle oben gezeigten, sowie weitere Basis-Wickelmuster generiert werden können, wird eine eigens entworfene Methode angewendet. Dafür wird das Bauteil in einzelne Segmente zerlegt, welche wie folgt für diese Arbeit definiert werden. Ein Segment beschreibt einen Kreis in einem Graphen, der keine Sehnen enthält. Eine Sehne in einem Graph ist nach *Diestel* [132] eine Kante, deren Ecken Teil eines Kreises in einem Graph sind, diese Kante selbst aber nicht Teil des Kreises ist.

In Abbildung 4.23 (links) sind anhand des Brakeboosters die möglichen Segmente angegeben. Des Weiteren ist ein Beispiel in Abbildung 4.23 (rechts) für einen Kreis, der kein Segment ist, angegeben. Hier ist im Kreis eine Sehne $\{v_2, v_{12}\}$ vorhanden, was laut oben eingeführter Definition, keinem Segment entspricht.

Mit diesen Segmenten ist es nun möglich, geeignete Basis-Wickelmuster zu erzeugen. Ein Basis-Wickelmuster ist dadurch gekennzeichnet, dass es nur ein einzelnes Segment oder direkt benachbarte Segmente ununterbrochen umschließt, unter Berücksichtigung

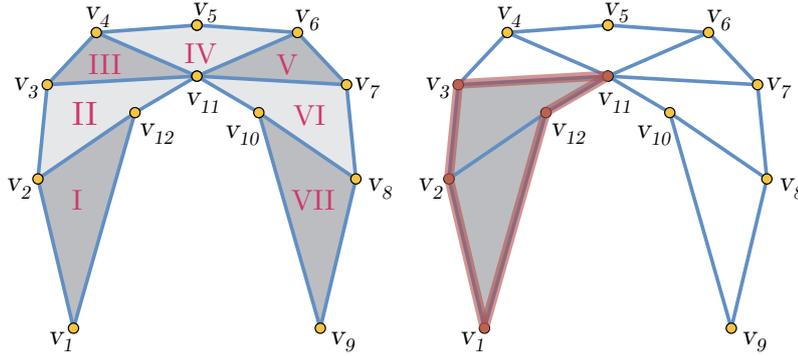


Abb. 4.23: Segmente zur Erzeugung der Basis-Wickelmuster am Beispiel des Brakeboosters (links) sowie ein ungültiges Segment (rechts), da die Sehne $\{v_2, v_{12}\}$ im Kreis vorhanden ist.

eventueller Symmetriebedingungen, wie in den Abbildungen 4.20, 4.21 und 4.22 zu erkennen. Die Anzahl dieser benachbarten Segmente, und somit der Anzahl der Basis-Wickelmuster, ist nur durch die Gesamtzahl der vorhandenen Segmente begrenzt. Wie man leicht sieht, kann die Anzahl der möglichen Basis-Wickelmuster mit der folgenden, rekursiven Reihe berechnet werden, wobei a_n die Anzahl der Basis-Wickelmuster wiedergibt und n die Anzahl der Segmente im Bauteil:

$$a_n = a_{n-1} + n \quad \forall n \geq 1, \quad a_0 := 0. \quad (4.2)$$

Mit Hilfe formaler Potenzreihen kann diese rekursive Reihe in eine explizite Formel überführt werden [135], was eine unabhängige Berechnung der Anzahl der Basis-Wickelmuster ermöglicht. Dies geschieht mit folgender erzeugender Funktion:

$$f := \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot x^n \in \mathbb{C}[[x]]. \quad (4.3)$$

Aus Einsetzen der Gleichung (4.2) in (4.3) und der Randbedingung $a_0 := 0$ folgt:

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} (a_{n-1} + n) \cdot x^n = \sum_{n=1}^{\infty} a_{n-1} \cdot x^n + \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot x^n. \quad (4.4)$$

Mit folgendem Zusammenhang der erzeugenden Funktion,

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n, \quad (4.5)$$

kann Gleichung (4.4) wie folgt umgeschrieben werden:

$$f = x \cdot f + \frac{x}{(1-x)^2} = \frac{x}{(1-x)(1-x)^2} = \frac{x}{(1-x)^3}. \quad (4.6)$$

Mittels Partialbruchzerlegung wird Gleichung (4.6) nun umgeformt zu:

$$f = \frac{1}{(1-x)^3} - \frac{1}{(1-x)^2}. \quad (4.7)$$

Diese beiden Terme werden wieder durch die formalen Potenzreihen, auf Basis von Gleichung (4.5), ersetzt.

$$f = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) \cdot x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) \cdot x^n. \quad (4.8)$$

$$f = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1}{2}(n+2)(n+1) - (n+1) \right) \cdot x^n. \quad (4.9)$$

Damit lautet die explizite Formel zur Berechnung der Anzahl der Basis-Wickelmuster a_n , bei gegebener Segment-Anzahl n , wie folgt:

$$\boxed{a_n = \frac{1}{2}(n+1)(n+2) - (n+1)} \quad \text{mit } a, n \in \mathbb{N}. \quad (4.10)$$

Im Beispiel des hier gezeigten Brakeboosters ergeben sich für die sieben vorhandenen Segmente insgesamt 28 Basis-Wickelmuster.

$$a_7 = \frac{1}{2}(7+1)(7+2) - (7+1) = 28. \quad (4.11)$$

4.7 Wickelmuster beim Brakebooster

Der Ausgangspunkt für die Erstellung der Wickelmuster ist ein topologieoptimiertes Modell (siehe Abb. 4.24). Zu Beginn wird dies, als Referenz, lediglich ein anisotrop topologieoptimiertes Modell sein, das die Anisotropie der Endloskohlenstofffasern bei der Topologieoptimierung berücksichtigt. Eine Berücksichtigung der Hybridisierung der gewickelten Struktur im Spritzgussverfahren findet erst später in dieser Arbeit statt. Diese anisotrope Topologieoptimierung wurde am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe von *K. Mehl* [107] durchgeführt und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Das Ergebnis dieser Berechnung besteht in der Regel aus einem Flächenmodell, weshalb die benötigte Materialmenge über die Breite der Fläche festgelegt wird und nicht über das Bauteilvolumen. Folgende Schritte müssen nun durchgeführt werden, um die Wickelmuster zu erzeugen.

1. Überführung des Berechnungsmodell in ein 3D-Modell
2. Unterteilung in einzelne Ecken, Kanten und Segmente (wenn möglich, Symmetrie nutzen)

3. Ermitteln der mittleren Breite des Bauteils in der jeweils dazugehörigen Kante (Ausmessen) und anschließende Gruppierung anhand der daraus resultierenden Lagenanzahl
4. Numerische Beschreibung der benötigten Materialmenge anhand der Kanten (wie viel Material wird auf einer bestimmten Kante benötigt) → **Soll-Matrix**
5. Generierung aller Basis-Wickelmuster
6. Numerische Beschreibung der Basis-Wickelmuster anhand der Segmente (wie viel Material wird von welchem Wickelmuster auf der jeweiligen Kante abgelegt) → **Muster-Matrizen**
7. Numerische Optimierung der Anzahl der zu verwendeten Basis-Wickelmuster und finale Erzeugung des Wickelplans → **Lösungs-Matrix**

In Abbildung 4.24 werden diese Schritte noch einmal graphisch kompakt dargestellt.

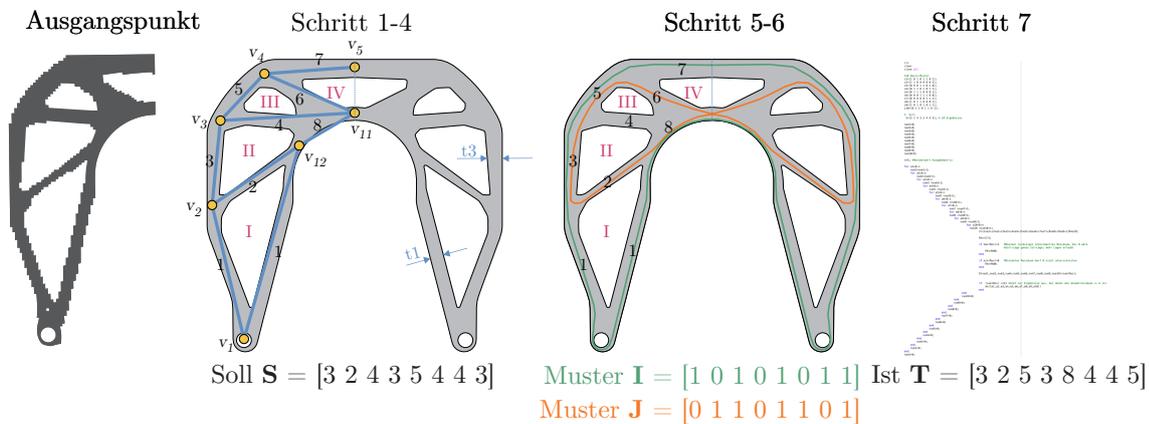


Abb. 4.24: Graphische Darstellung der Berechnung der Wickelmuster anhand eines anisotrop topologieoptimierten Brakeboosters.

In den nachfolgenden Abschnitten wird detaillierter auf die Entstehung der Matrizen und die Berechnung des finalen Wickelplans eingegangen. In der Tabelle 4.3 sind zu Beginn alle verwendeten Notationen mit dem Aufbau der jeweiligen Matrix bzw. Variable und einer Beschreibung aufgeführt.

4.7.1 Erzeugung der Soll-Matrix

Erster Schritt ist die Generierung des Ausgangszustandes anhand des CAD-Modells des Strukturbauteils. Das Strukturbauteil wird in einzelne, zusammenhängende Segmente (römische Notation) mit einzelnen Kanten (arabische Notation) zerlegt. Im Beispiel des hier gezeigten Brakeboosters ergeben sich insgesamt 16 Kanten, bei 7 Segmenten. Da dieses Bauteil jedoch symmetrisch bezüglich der Mittelebene ist und Segment 1 am Rand liegt, ergeben sich insgesamt 8 unabhängige Kanten, bei vier unabhängigen Segmenten (siehe Abb. 4.24). Aufgrund der Randlage des Segments 1 weist dieses nur zwei unabhängige Kanten auf (Kante 1 und 2). Bei der Erzeugung von Basis-Wickelmustern müssen immer beide Kanten $\{v_1, v_2\}$ und $\{v_{12}, v_1\}$ unwickelt werden und deshalb sind

Tab. 4.3: Bezeichnung, Aufbau und Beschreibung der verwendeten Matrizen und Variablen für die Berechnung des Wickelplans.

Name	Bezeichnung	Aufbau	Beschreibung
Soll	\mathbf{S}	[1x8]	gewünschte Soll-Anzahl der Lagen auf jeder Kante (generiert aus Topologieoptimierung)
Muster	\mathbf{Z}	[10x8]	enthält alle Basis-Wickelmuster
Ausgabe	\mathbf{A}_n	[1x10]	Anzahl der zu wickelnden Basis-Wickelmuster zum Erzeugen der dazugehörigen Lösungs-Matrix
Lösung	\mathbf{L}_n	[1x8]	Lagenanzahl auf jeder Kante, durch \mathbf{A}_n erzeugt
Residuum	\mathbf{R}	[1x8]	Differenz Lagenanzahl auf jeder Kante zwischen Lösungs- & Ist-Matrix
Gesamt-residuum	R	[1x1]	Summe aller Einzelabweichungen der Residuums-Matrix \mathbf{R}
Indikator	K	[1x1]	Anzahl der verwendeten Basis-Wickelmuster
Einsvektor	$\mathbb{1}_8$	[8x1]	Einsvektor, bestehend aus Einträgen nur mit der Zahl 1
Ausgabe	\mathbf{A}_n^*	[1x10]	mit Hilfe der Residuums-Bedingungen reduzierte Variante der Ausgabe-Matrizen
Ist	\mathbf{T}	[1x8]	finale Lösungsmatrix

diese nicht unabhängig voneinander. Über die Breite des Bauteils im Bereich der jeweiligen Kante kann die benötigte Materialmenge approximiert werden. Dabei wird beim Brakebooster immer die mittlere Breite der Topologieoptimierung genutzt, bis auf Kante 6 ist diese relativ konstant, da die Breite des Bauteils innerhalb einer einzelnen Kante im Wickelverfahren konstant gehalten werden muss. Bei anderen Bauteilen, mit einer hohen Differenz zwischen der breitesten und dünnsten Stelle in einer Kante, sollte ein anderes Verfahren zur Ermittlung der Lagenanzahl genutzt werden. Beispielsweise kann dies mit der gemittelten Breite, oder mit der maximale Breite in der jeweiligen Kante geschehen. Über das Verhältnis der einzelnen Breiten zueinander, ergibt sich nun die folgende Soll-Matrix \mathbf{S} für die benötigte Anzahl von Lagen in der jeweiligen Kante (mit Berücksichtigung der Symmetrie) in Form einer 1x8-Matrix. Kante 1 benötigt dabei drei Lagen, Kante 2 benötigt zwei Lagen, etc.

$$\mathbf{S} = [3 \ 2 \ 4 \ 3 \ 5 \ 4 \ 4 \ 3] \in \mathbb{N} \quad (4.12)$$

4.7.2 Erzeugung der Muster-Matrix

Damit ein zielgenauer Lagenaufbau des Bauteils möglich ist, sollen nur Basis-Wickelmuster genutzt werden, welche anschließend beliebig miteinander kombiniert

werden können. Mit Hilfe der in Abschnitt 4.6.2 vorgestellten Einteilung eines Bauteils in Segmente und der Ausnutzung der symmetrischen Eigenschaften des Brakeboosters, können die benötigten Basis-Wickelmuster berechnet werden. Da der hier gezeigte Brakebooster ein symmetrisches Bauteil ist und dementsprechend die Basis-Wickelmuster auch symmetrisch aufgebaut werden sollen, reduziert sich die Zahl der vorhandenen Segmente im Brakebooster auf vier (siehe Abb. 4.24). Mit Hilfe der Gleichung (4.10) ergeben sich 10 symmetrische Basis-Wickelmuster:

$$a_4 = \frac{1}{2}(4+1)(4+2) - (4+1) = 10 \quad (4.13)$$

In Tabelle 4.4 ist dies anhand der binären Reihenfolge für die vier Segmente, also 2^4 Kombinationen, noch einmal tabellarisch dargestellt. Bei einer Zahl 1 wird das Segment umwickelt, bei einer 0 nicht. Dadurch ergeben sich die 10 Basis-Wickelmuster, bei welchen in der Tabelle 4.4 noch einmal die ununterbrochenen, benachbarten Segmente, sowie die Einzelsegmente, hervorgehoben werden. Die Kombination $[1\ 0\ 1\ 1]$ ergibt kein Basis-Wickelmuster, da nicht alle Segmente ununterbrochen miteinander benachbart sind. Beispielsweise entstehen die in Abbildung 4.9 gezeigten Muster I und J aus den Segmenten I-IV, also $[1\ 1\ 1\ 1]$, bzw. den Segmenten II-III, also $[0\ 1\ 1\ 0]$.

Tab. 4.4: Erzeugung der Basis-Wickelmuster anhand der Segmente I-IV; bewickelt bei 1, nicht bewickelt bei 0.

I	II	III	IV	Muster
0	0	0	0	-
0	0	0	1	G
0	0	1	0	F
0	0	1	1	C
0	1	0	0	E
0	1	0	1	-
0	1	1	0	J
0	1	1	1	D
1	0	0	0	B
1	0	0	1	-
1	0	1	0	-
1	0	1	1	-
1	1	0	0	H
1	1	0	1	-
1	1	1	0	A
1	1	1	1	I

Nachdem die Basis-Wickelmuster, sowie die zu berücksichtigenden Segmente bekannt sind, kann anhand der dabei überfahrenen Kanten, mit allen Mustern nach Tabelle 4.5, eine Basis-Muster-Matrix \mathbf{Z} erstellt werden.

Tab. 4.5: Übersicht über die zu erzeugenden Muster-Matrizen anhand der überfahrenen Kanten 1-8.

Muster	1	2	3	4	5	6	7	8	Matrix-Name
A	1	0	1	0	1	1	0	1	z_1
B	1	1	0	0	0	0	0	2	z_2
C	0	0	0	1	1	0	1	0	z_3
D	0	1	1	0	1	0	1	1	z_4
E	0	1	1	1	0	0	0	1	z_5
F	0	0	0	1	1	1	0	0	z_6
G	0	0	0	0	0	1	1	0	z_7
H	1	0	1	1	0	0	0	1	z_8
I	1	0	1	0	1	0	1	1	z_9
J	0	1	1	0	1	1	0	1	z_{10}

Diese 10x8 Matrix \mathbf{Z} weist in den Zeilen die jeweiligen Muster z_i und in den Spalten die jeweilige Kantenummer (1 bis 8) auf. Dabei kennzeichnet eine 1 wieder das Überfahren der jeweiligen Kante, also das Ablegen von Material auf dieser Kante. Im Muster B muss aufgrund der Geometrie des Brakeboosters die Kante 8 zweimal umfahren werden. Entsprechend der Tabelle 4.5 folgt für die Basis-Muster-Matrix \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.14)$$

In Abbildung 4.25 sind noch einmal alle Basis-Wickelmuster für den hier gezeigten Brakebooster vollständig, also gespiegelt zur Mittelebene, abgebildet.

4.7.3 Berechnung der Lösungs-Matrizen

Nachdem nun alle Wickelmuster aus der Basis-Muster-Matrix \mathbf{Z} und die Soll-Matrix \mathbf{S} bekannt sind, können durch die Kombination der unterschiedlichen Basis-Wickelmuster die Lösungs-Matrizen \mathbf{L}_n erstellt werden. Die einzelnen Lösungs-Matrizen beschreiben dabei die Anzahl der TowPreg-Lagen auf jeder Kante (1 bis 8), welche durch alle Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Muster entsteht. Folgende Randbedingungen sollen beim Erstellen der Lösungs-Matrizen \mathbf{L}_n berücksichtigt werden:

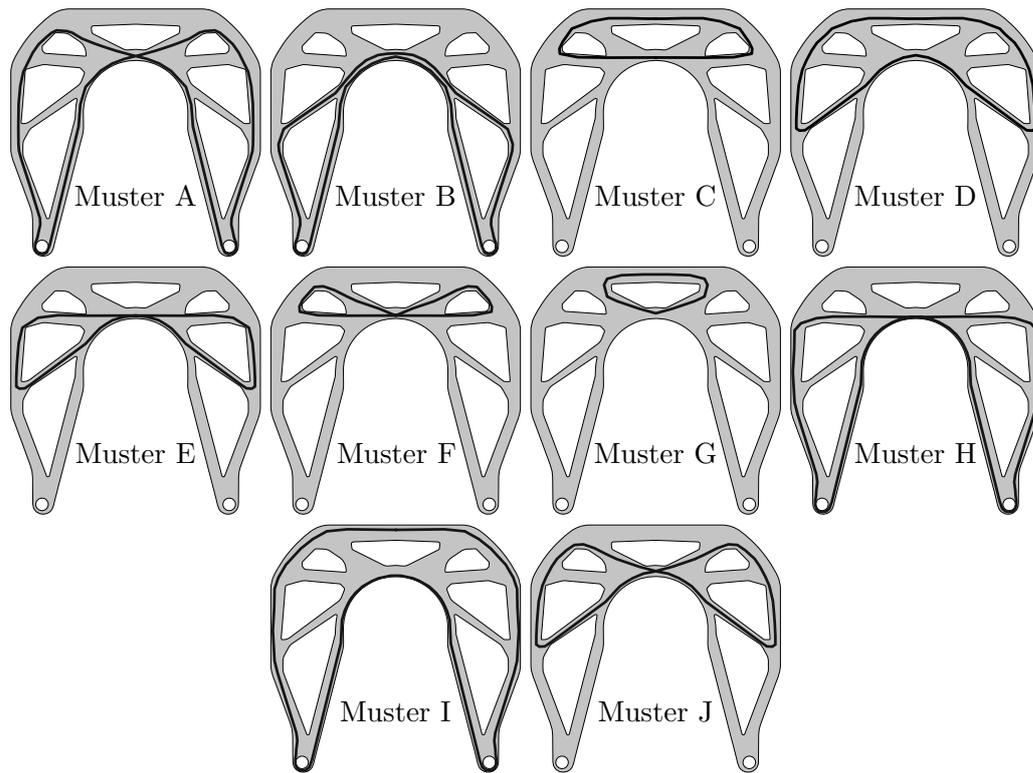


Abb. 4.25: Darstellung aller 10 Basis-Wickelmuster

1. Nicht jedes Basis-Wickelmuster (z_i) muss gewickelt werden
2. Ausschluss der Wickelmuster, die nicht oder nur sehr schwer wickelbar sind
3. Die maximale Anzahl eines Musters im Wickelplan ist durch die höchste Anzahl an Lagen in der Soll-Matrix beschränkt (in diesem Fall 5 Lagen bei Kante 5)
4. Jede Kante muss mindestens die Minimalanzahl der berechneten Lagen aus der Soll-Matrix aufweisen

Bei 10 vorhandenen Basis-Wickelmustern, wobei jedes maximal fünfmal vorkommen darf (0 bis 5), ergeben sich somit 6^{10} Lösungsmöglichkeiten, also über 60 Million Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Basis-Wickelmuster. Bei Berücksichtigung von Punkt 2, können beim hier zu fertigenden Brakebooster zwei Wickelmuster (F & G) ausgeschlossen werden. Es bleiben somit immer noch 6^8 Lösungsmöglichkeiten, was ca. 1,7 Million Kombinationen entspricht. Da bis zu diesem Zeitpunkt alle Muster in Matrixschreibweise angegeben wurden, können mit Hilfe eines Berechnungstools für Matrizen, z.B. der Software *MATLAB*, die Lösungen automatisiert generiert werden. Da jedes Muster nur in einer begrenzten Anzahl auftreten und auch nur ganzzahlig, positive Werte annehmen kann, ist es in diesem Beispiel möglich, dass mit einer geringen Anzahl von Basis-Wickelmustern und einer vollständigen Enumeration alle möglichen Ergebnisse in einer sehr kurzen Zeitspanne (wenige Sekunden) berechnet werden können.

Alternativ zur vollständigen Enumeration, kann auch eines der vielen bekannten Optimierungsverfahren angewendet werden. Das vorliegende Problem kann dabei in die

Klasse der sogenannten Mengenüberdeckungsprobleme (set cover problem) eingeordnet und mathematisch beschrieben werden. Bei Mengenüberdeckungsproblemen wird versucht, eine gegebene Gesamtmenge, mit Hilfe einer Anzahl unterschiedlicher Teilmengen, abzubilden. Dieses Problem gehört der Problemklasse NP-vollständig (nicht-deterministisch polynomielle Zeit) an [136], welche die „schwersten“ zu lösenden Probleme der NP-Klasse beinhaltet, die effizient verifizierbar, nicht aber effizient lösbar sind [137].

Mit Hilfe des Programms *GAMS Studio*, kann die vorliegende Aufgabenstellung in einem ganzzahlig linearen Optimierungsproblem, nach *Sand et al.* [138], gelöst werden. *GAMS Studio* ist eine Entwicklungsumgebung zur Lösung von mathematischen Optimierungsproblemen. Analog zur Berechnung der vollständigen Enumeration in *MATLAB*, werden auch hier die Basis-Wickelmuster und die einzelnen Matrizen in Matrix-Schreibweise angegeben. Das zu lösende Optimierungsproblem, also die Zielgröße, ist auch hier die Minimierung der Summe der Einzelresiduen R . Dabei kommen beide Varianten, sowohl die vollständige Enumeration wie auch die Lösung des Optimierungsproblems, auf die identischen Lösungen. Die Optimalitätslücke im Optimierer ist dabei geschlossen, was bedeutet, dass keine besseren Lösungen vorhanden sind.

Bei einer Optimierung werden, im Gegensatz zur vollständigen Enumeration, nicht alle möglichen Lösungen berechnet. Es wird hingegen die optimale Lösung mit Hilfe von Algorithmen bestimmt [139]. Dies spiegelt sich auch in der Laufzeit der beiden Programme wider (Abb. 4.26). Bei einer vollständigen Enumeration steigt die Laufzeit des Codes, bereits bei kleinen Anzahlen von Wickelmustern an (in diesem Beispiel bei 11 Mustern). Dabei darf hier, entsprechend der maximalen Lagenanzahl in der Soll-Matrix, jedes Muster nur maximal fünfmal vorkommen. Eine Erhöhung auf sechs hätte zur Folge, dass die Laufzeit bereits zu einem früheren Zeitpunkt, hier ab 10 unterschiedlichen Basis-Wickelmustern, über-linear ansteigen würde.

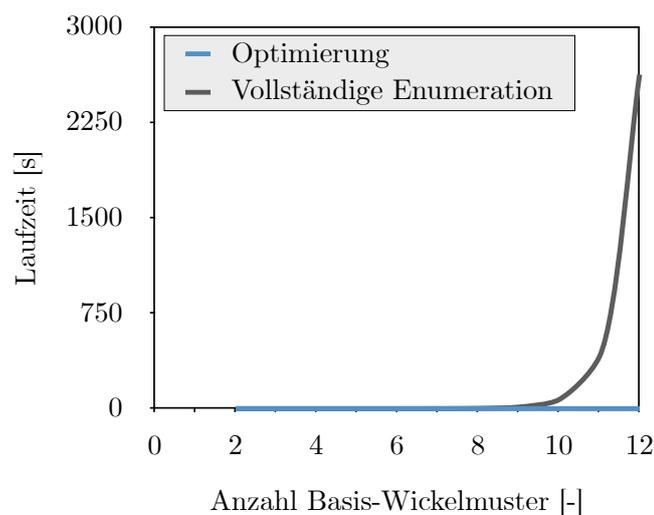


Abb. 4.26: Vergleich der Laufzeit der Programme für die Lösungsermittlung, bei unterschiedlicher Anzahl von Basis-Wickelmustern, anhand einer Optimierung (*GAMS*) und einer vollständigen Enumeration (*MATLAB*).

Bei der Nutzung des Optimierers zum Lösen dieses Problems, spielen diese Grenzen erst weitaus später, bzw. gar keine Rolle. So wird die maximal zulässige Anzahl eines einzelnen Basis-Wickelmusters nicht beschränkt und die Laufzeit bleibt in diesem Beispiel auf einem konstant niedrigen Wert von ca. 0,06 Sekunden. Erst bei größeren Problemen ist auch hier ein Anstieg der Laufzeit zu erwarten.

Nachteilig an der Nutzung eines Optimierers ist allerdings die mathematische Beschreibung sowie das Finden einer passenden Lösungsstrategie, welche beide teilweise äußerst zeitintensiv sind und Expertenwissen bedarf. Aus diesem Grund sowie der begrenzten Modellgröße des Brakeboosters, wird für das Problem hier eine vollständige Enumeration durchgeführt. Das Vorgehen hierfür wird im folgenden beschrieben.

Für die hier angewandte, vollständige Enumeration, wird die Grundgesamtheit der Lösungs-Matrizen wie folgt berechnet. Dabei enthält die Ausgabe-Matrix \mathbf{A} jeweils die Anzahl der dazugehörigen verwendeten Muster von $\mathbf{A}_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ bis $\mathbf{A}_n = [5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 5 \ 0 \ 0 \ 5 \ 5 \ 5]$ (a_6 und a_7 sind 0, da Muster F & G ausgeschlossen wurden):

$$\mathbf{L}_n = \mathbf{A}_n \cdot \mathbf{Z} , \quad (4.15)$$

mit

$$\mathbf{A}_n = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8 \ a_9 \ a_{10}] \quad \text{mit } a_i \in \mathbb{N} . \quad (4.16)$$

Die Auswahl und Reduzierung der ausgegebenen, möglichen Lösungs-Matrizen \mathbf{L}_n , basiert auf der Berechnung der Residuums-Matrix \mathbf{R} .

$$\mathbf{R} = \mathbf{L}_n - \mathbf{S} . \quad (4.17)$$

Das Einzelresiduum (Zahlenwert der jeweiligen Spalte der Matrix \mathbf{R}) beschreibt die jeweiligen Abweichungen in jeder einzelnen Kante des Bauteils zwischen vorhandener Lagenanzahl (berechneter Wert der jeweiligen Spalte in der Lösungs-Matrix \mathbf{L}_n) und gewünschter Lagenanzahl (vorgegebener Wert der jeweiligen Spalte in der Soll-Matrix \mathbf{S}). Dies soll verhindern, dass eine Kante im Bauteil stark überdimensioniert dargestellt wird. Das Gesamtresiduum R ist die Summe aller Einzelabweichungen der Matrix \mathbf{R} . Zusätzlich wird der Indikator K eingeführt. Dieser berücksichtigt die vorhandene Anzahl unterschiedlicher Basis-Wickelmuster, die über die Lasteinleitungspunkte, also Kante 1, führen (Muster A, B, H & I). Je höher der Indikator, desto besser. Dies liegt daran, dass die Kräfte bei diesen Mustern direkt an der Lasteinleitungsstelle ins CFK eingeleitet werden können.

$$K = a_1 + a_2 + a_8 + a_9 . \quad (4.18)$$

Die Ausgabe-Matrizen \mathbf{A}_n des Codes enthalten die Zusammensetzung der Wickelmuster der jeweiligen Lösungs-Matrizen \mathbf{L}_n , welche die Residuums-Randbedingungen

erfüllen. Sie geben an, wie oft das jeweilige Muster z_i im Wickelplan vorkommen muss. Mit Hilfe dieser Ausgabematrizen kann dann nachfolgend ein Lagenaufbau erstellt werden. Der Algorithmus arbeitet demnach folgenden Befehl ab:

Erstelle für alle möglichen Kombinationen von Basis-Wickelmustern z_i eine eigene Lösungs-Matrix L_n und gebe für alle Lösungs-Matrizen, die die Residuums-Bedingungen R erfüllen, die Ausgabe-Matrix A_n^* aus, die die Anzahl der zu verwendeten Muster enthält sowie den Indikator K , der die Anzahl der unterschiedlich verwendeten Lasteinleitungs-Basis-Wickelmuster angibt.

Für das hier gezeigte Beispiel lauten die händisch generierten Residuums-Bedingungen wie folgt:

$$\text{Einzelresiduum} \quad 0 \leq \min(\mathbf{R}) < 4 \quad (4.19)$$

$$\text{Gesamtresiduum} \quad R = \mathbf{R} \cdot \mathbb{1}_8 \leq 6 \quad (4.20)$$

Für das hier gezeigte Beispiel ergeben sich zwei Lösungen, A_1^* und A_2^* .

$$\mathbf{A}_1^* = [2 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2] \quad \text{mit } K = 2 \quad (4.21)$$

$$\mathbf{A}_2^* = [3 \ 0 \ 3 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad \text{mit } K = 1 \quad (4.22)$$

Anhand dieser Ergebnisse wird für dieses Beispiel die Matrix A_1^* ausgewählt, da hier zwei ($K = 2$) der vier Wickelmuster über die Lasteinleitungspunkte führen, bei A_2^* ist es nur ein Muster ($K = 1$). Aus dieser Ausgabe-Matrix folgt nun, dass 2x Muster A, 3x Muster C, 1x Muster I und 2x Muster J genutzt werden sollen.

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}_1^* \cdot \mathbf{Z} = [2 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [3 \ 2 \ 5 \ 3 \ 8 \ 4 \ 4 \ 5]. \quad (4.23)$$

Diese finale Lösungs-Matrix entspricht nun der Ist-Matrix T des Brakeboosters, die im Vergleich zur Soll-Matrix S insgesamt 6 Lagen ($R = 6$) und maximal 3 Lagen in einer einzelnen Kante zu viel aufweist (siehe Tabelle 4.6).

Es ist in diesem Beispiel also nicht möglich, mit den vorhandenen Basis-Wickelmustern exakt die Soll-Matrix, also das topologieoptimierte Modell, nachzubilden. Einzelne Kanten werden geringfügig zu stark ausgebildet. In dieser Variante wird der Brakebooster im nachfolgendem Kapitel gefertigt, getestet und mit anderen Herstellungsvarianten des Brakeboosters verglichen.

Tab. 4.6: Übersicht über die finale Anzahl der Lagen/Überfahrungen in jeder Kante des Brakeboosters mit vorgegebener Soll-Anzahl, vorhandener Ist-Anzahl und dem Residuum in jeder Kante.

Kante	1	2	3	4	5	6	7	8
Ist \mathbf{T}	3	2	5	3	8	4	4	5
Soll \mathbf{S}	3	2	4	3	5	4	4	3
Residuum \mathbf{R}	0	0	1	0	3	0	0	2

4.8 Zwischenfazit

Im Rahmen dieses Kapitels konnte anhand eines Demonstrators die computerbasierte Generierung von Wickelmustern, die Herstellung solcher Strukturen mit einem speziell entwickelten Wickelkopf mit Fadenspannungseinheit und neuartiger Trenneinheit sowie die fertigungsgerechte Herstellung von Materialproben im Wickelverfahren gezeigt werden. Die Wickelmuster werden dabei durch eine Übertragung der Bauteilgeometrie in einen Graphen erzeugt und über eine vollständige Enumeration werden anschließend die benötigten Wickelmuster (Typ und Anzahl) berechnet. Mit Hilfe des Wickelkopfes ist es somit möglich, effizient und lokal variabel, Endlosfasern zu einer Struktur im 3D-Wickelverfahren roboterbasiert zu fertigen.

Der Einfluss der Fadenspannung auf die Druckfestigkeit von gewickelten CFK-Proben konnte nicht nachgewiesen werden, jedoch konnte eine neue Fertigungsmethode für die Herstellung von gewickelten CFK-Probekörpern vorgestellt werden. Diese ermöglicht es, effizient und zuverlässig faserparallele Probekörper zu fertigen. Dabei entfällt der nachträgliche Zuschnitt von Probekörpern aus gewickelten Probetafeln sowie ein nachträgliches Aufkleben von Aufleimern, was beides zeit- und kostenintensive Prozesse sind.

Kapitel 5

Hybride duroplastisch-thermoplastische Proben

Im vorliegenden Kapitel gilt es die grundsätzliche Machbarkeit des vorgeschlagenen, hybriden Verfahrens nachzuweisen. Hier wird zunächst das hybride Interface genauer definiert und anschließend ein Versuch beschrieben und durchgeführt, der zur Ermittlung der Interface-Festigkeit von hybriden duroplastisch-thermoplastischen Proben genutzt wird. Dafür wird eine neue Probekörper-Geometrie entworfen, die roboterbasiert gefertigt wird und in einem Auszugstest untersucht wird. Die Vorbehandlung der CFK-Struktur erfolgt dabei u.a. mit unterschiedlichen Prozessgasen im Niederdruckplasmaverfahren. Anhand unterschiedlicher mikroskopischer Aufnahmen kann der Effekt des Niederdruckplasmas nachgewiesen werden.

5.1 Hybrides Interface

Die adhäsive Verbindung zweier Werkstoffe erfolgt im Bereich des Interfaces, welches die Grenzfläche zwischen zwei Komponenten charakterisiert. In dem hier vorgestellten Verfahren kann das Interface in zwei Arten eingeteilt werden, einem matrixdominierendem Interface und einem faserdominierendem Interface (siehe Abb. 5.1).

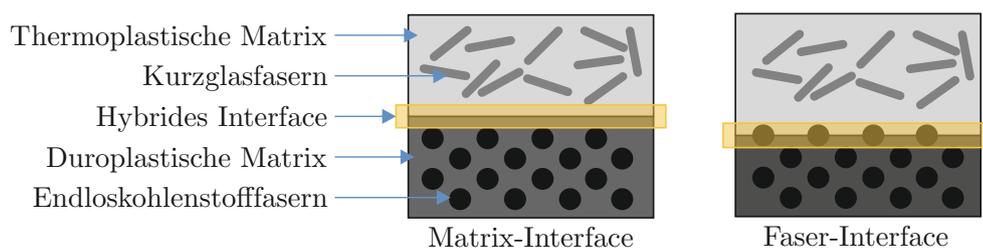


Abb. 5.1: Hybrides Matrix- und Faser-Interface.

Beim Matrix-Interface befinden sich in der Grenzfläche nur die beiden Matrixwerkstoffe (Duroplast und Thermoplast) in Kontakt. Die Endloskohlenstofffasern sowie die Kurzglasfasern stehen nicht in Kontakt mit dem jeweils anderen Matrixmaterial. Eine bessere Variante, vor allem in Anbetracht des Kraftflusses, ist das Faser-Interface. Hierbei wird die oberste Schicht der Endlosfaserverstärkung freigelegt und das thermoplastische Spritzgussmaterial steht, zusätzlich zur duroplastischen Matrix, auch direkt mit den Endlosfasern in Kontakt. Somit können Kräfte direkt zwischen den Endloskohlenstofffasern und der thermoplastischen Matrix übertragen werden, ohne den Umweg über das duroplastische Matrixmaterial nehmen zu müssen.

Es sei hier noch angemerkt, dass die gewünschte Kraftübertragung von der thermoplastischen Matrix auf die Endloskohlenstofffasern und damit der Hauptnutzen des Faser-Interfaces stark von der Anbindung der Matrix an die Fasern selbst abhängig ist. Diese Anbindung findet im Regelfall über eine Schlichte auf den Fasern statt. Diese Schlichte wird nach einer elektrochemischen Aktivierung der Kohlenstofffasern, welche sauerstoffhaltige Gruppen aufbringt, aufgetragen und schützt die Fasern vor mechanischen Einflüssen im weiteren Verarbeitungsprozess und steigert die Benetzbarkeit und die Anhaftung der Matrix an die Fasern [140]. Die vorhandene Schlichte der Kohlenstofffasern ist, dem Matrix-Material entsprechend, jedoch auf Epoxidharz angepasst und nicht auf Polyamid 6. Es ist aber davon auszugehen, dass die Schlichte der C-Fasern beim Freilegen der Fasern mit abgetragen wird und somit kein falscher Schlichte-Typ vorhanden ist, sondern gar keiner [101].

Damit es zu einer Kraftübertragung zwischen dem thermoplastischen Spritzgussmaterial und den beiden Komponenten der umspritzten Struktur (freigelegte Endloskohlenstofffasern und duroplastische Matrix) kommen kann, soll eine Verbindung unter den Komponenten ermöglicht werden. Aufgrund der in diesem Verfahren genutzten artfremden Werkstoffe (Duroplast und Thermoplast), der niedrigen Polarität, Reaktivität und Oberflächenenergie des Thermoplast [81] sowie der fehlenden Schlichte auf den Kohlenstofffasern [141], muss die spezifische Adhäsion durch eine Vorbehandlung der duroplastischen FKV-Struktur erhöht werden. Dafür sollte nach dem Freilegen der Endloskohlenstofffasern, im ersten Schritt, die Benetzbarkeit der duroplastischen Struktur und der freigelegten Fasern stark erhöht werden. Beide Komponenten besitzen im unbehandelten Zustand eine ähnlich niedrige Oberflächenenergie von ca. $32,9 \text{ mJ/m}^2$ (Epoxid [142]) bzw. 32 mJ/m^2 (Kohlenstofffasern [143]), wobei für beide Komponenten je nach Literatur auch andere Werte zu finden sind [101]. Eine Erhöhung der Oberflächenenergie, z.B. durch die Bildung von Radikalen, steigert die Benetzbarkeit [28]. Zum anderen sollten funktionelle Gruppen an der Oberfläche erzeugt werden, um chemische Bindungen zum thermoplastischen Spritzgussmaterial zu ermöglichen. Für das Erzeugen einer zusätzlichen mechanischen Adhäsion muss die duroplastische Struktur im hier genutzten Prozess vor dem Umspritzen angeraut und idealerweise vorgewärmt werden.

Bei der Auswahl der Vorbehandlungsmethode, für die Erzeugung eines solchen hybriden Faser-Interfaces ist, wie oben genannt, darauf zu achten, dass das Matrixmaterial stärker abgetragen werden soll (bezogen auf die Tiefe) und die Endlosfasern somit freigelegt werden. Die Abtragung muss daher ungleichmäßig erfolgen (siehe Abb. 5.2).

Außerdem gilt es zu beachten, dass die Endlosfasern nicht beschädigt werden. Des Weiteren soll auch die Anbindung des Spritzgussmaterials an besagten freigelegten Endlosfasern sowie der duroplastischen Matrix ermöglicht werden.

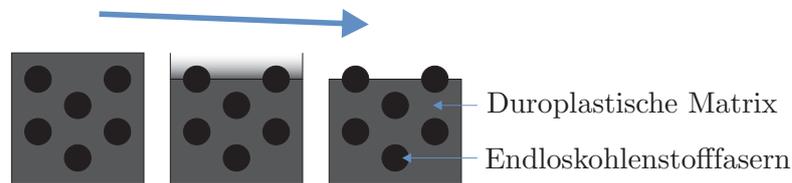


Abb. 5.2: Ungleichmäßige Vorbehandlung der endlosfaserverstärkten Struktur, zur Generierung eines Faser-Interfaces.

In Tabelle 5.1 wird ein Vergleich von unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden gezeigt, eingeteilt nach den jeweiligen bekannten Wirkprinzipien: chemisch (z.B. Beizen und Ätzen), mechanisch (z.B. Strahlen) und physikalisch-chemisch (z.B. Atmosphären- und Niederdruckplasma, Laserstrahl).

Tab. 5.1: Vergleich von unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden zur Erzeugung eines Faser-Interfaces für hybride duroplastisch-thermoplastische Bauteile.

	Beizen / Ätzen	Strahlen	Atmosphären- druckplasma	Niederdruck- plasma	Laserstrahl
Reinigen	+	o	+	+	+
Aktivieren	+	-	+	+	o
großflächige Behandlung	+	+	o	+	o
Faser- Interface	o	-	+	+	+
Bauteil- schädigung	o	o	+	+	o
räumliche Vorbehandlung	+	+	o	+	-
Umwelt- verträglichkeit	-	+	+	+	+

+ positiv o neutral - negativ

Am vielversprechendsten für diese Anforderungen ist eine physikalisch-chemische Vorbehandlung mit Niederdruckplasma. Hiermit können, im Gegensatz zur Laserbehandlung [144] oder dem Atmosphärendruck-Plasma [27], dreidimensionale Bauteile einfach und kostengünstig [145], räumlich und großflächig in einem Arbeitsschritt vorbehandelt werden. In diesem Prozess findet sowohl eine Reinigung der Oberfläche,

ein Wegätzen der duroplastischen Matrix, als auch eine Aktivierung der Fasern und des restlichen Matrixmaterials zur Haftverbesserung statt. Die Prozesstemperaturen sind relativ niedrig ($< 100\text{ °C}$) [145] wodurch es zu keiner Bauteilschädigung kommt. Bei der Verwendung von beispielsweise Luft als Prozessgas ist dies, beim niedrigen Energieverbrauch der Anlagentechnik, ein sehr umweltverträglicher Prozess.

Die Investitionskosten für die räumliche Bearbeitung von dreidimensionalen Bauteilen mittels Atmosphärendruckplasma sind höher als beim Niederdruckplasmaverfahren. Es bedarf, je nach Komplexität des Bauteils, eine aufwendige Führung der Düse mittels Roboter. Dafür ist jedoch eine Inline-Vorbehandlung möglich. Auch ist die thermische Belastung der Bauteile (Plasmastrahl ca. $200\text{-}300\text{ °C}$) relativ hoch [146].

Eine Vorbehandlung von CFK-Bauteilen, zum Verbinden mit thermoplastischem Spritzgussmaterial, mittels Laserstrahl, ist sehr gut möglich und wurde bereits erfolgreich durchgeführt [89]. Allerdings sind die Anschaffungskosten der Anlage sehr hoch. Des Weiteren wirkt eine hohe thermische Belastung [89] auf die Bauteile und eine automatisierte, räumliche Behandlung von dreidimensionalen Strukturen ist nur mit einem sehr hohem Aufwand möglich. Die Aktivierung der Oberfläche ist hier nur teilweise über die Einbringung von Sauerstoffatomen in Kohlenstoffketten möglich [27].

Ein weiteres mögliches Verfahren, wäre das chemische Ätzen im Beizverfahren. Aufgrund der verwendeten Chemikalien ist dies allerdings kein umweltverträglicher Prozess und wird deshalb nur selten eingesetzt [27, 28]. Auch muss bei der Auswahl des Beizmittels darauf geachtet werden, dass die Matrix abgetragen wird, die Kohlenstofffasern aber nicht und dass das Bauteil nicht zusätzlich an anderen, unerwünschten Bereichen geschädigt wird.

Eine mechanische Vorbehandlung, beispielsweise durch ein Strahlverfahren, weist auch einige Nachteile bezüglich der Oberflächenvorbehandlung auf. Es findet keine Aktivierung der Oberfläche statt und die Erzeugung eines definierten Faser-Interfaces erweist sich aufgrund des Prozesses als schwierig.

Ziel dieser Arbeit soll es sein, ein belastbares Faser-Interface zwischen den beiden FKV-Werkstoffen mittels Niederdruckplasma zu erzeugen, bei welchem eine Anbindung der lasttragenden Endloskohlenstofffasern sowie der duroplastischen Matrix, an die thermoplastische Matrix ermöglicht wird.

5.2 Auszugsversuch zur Ermittlung der Interface-Festigkeit

Für die Untersuchung der Festigkeit der Anbindung hybrider Materialien gibt es keine festgelegte Norm, weshalb häufig Untersuchungen aus dem Bereich der Klebstoffverbindungen genutzt werden [26]. Innerhalb der Festigkeitsuntersuchungen von Klebstoffverbindungen, sind am weitesten verbreitet die Zugscherversuche (z.B. ISO 4587, EN 1465), Schubversuche (z.B. ISO 11003-1) oder Schälversuche (z.B. ISO 11339,

DIN EN 1464). Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein eigener Versuch gezeigt, der an die hybriden Metall-Kunststoff-Versuche von *Paul et al.* [26] angelehnt ist.

In dem hier gezeigten Versuch handelt es sich um einen sogenannten Auszugsversuch. Dabei werden rechteckige Einleger umspritzt und im Anschluss daran aus dem Spritzgussmaterial herausgezogen. Die dabei entstehende maximale Auszugskraft wird als Kriterium für die maximale Festigkeit der Verbindung herangezogen. Als maximale Festigkeit der Verbindung wird die gemittelte Schubspannung herangezogen, die im Bereich der Grenzfläche wirkt. Gemittelt deshalb, da es ähnlich einer Klebeverbindung, zu Spannungserhöhungen kommt, die aufgrund von Steifigkeitssprüngen beim thermoplastischen Material auftreten und um ein Vielfaches höher sind, als die gemittelten Werte. Abbildung 5.3 zeigt den Versuchsaufbau mit den Interface-Abmessungen.

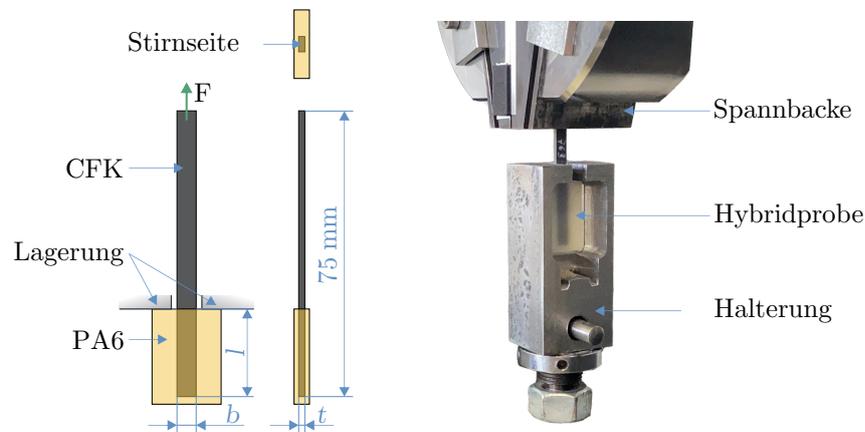


Abb. 5.3: Schematische Darstellung des Auszugsversuches mit Abmessungen der Interface-Region (links) und Foto des Auszugsversuches v3 (rechts).

Die gemittelte Schubspannung $\bar{\tau}$ wird wie folgt, mit den in Abbildung 5.3 gezeigten Abmessungen, berechnet.

$$\bar{\tau} = \frac{F}{2((l \cdot b) + (l \cdot t))} \quad (5.1)$$

Um den erwarteten Spannungsverlauf im Auszugsversuch zu überprüfen und die genutzte Fläche für die Berechnung der gemittelten Schubspannung zu validieren, wird eine vereinfachte FEM-Berechnung des Versuchs durchgeführt. Die Materialien für die FEM-Berechnung sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Hierfür wird ein unidirektionaler CFK-Einleger mit einer vereinfachten PA6 Interface-Fläche, mit einer Dicke von 0,1 mm, umhüllt. Diese ist wiederum vom PA6GF30 umschlossen. Der Interface-Bereich wird vereinfacht aus reinem PA6 modelliert, da nur der grobe Schubspannungsverlauf berechnet wird. In Realität liegt in diesem Bereich natürlich eine komplexe Zusammensetzung aus PA6, Epoxidharz, Endloskohlenstofffasern und Kurzglasfasern vor.

Tab. 5.2: Verwendete Materialien für die FEM-Berechnung mit jeweils zugehörigem E-Modul.

Bezeichnung	E-Modul [GPa]
UD-CFK	$E_x = 170$
PA6GF30	$E = 8,2$
PA6-Interface	$E = 2,4$

Das Modell wird am PA6GF30 fixiert gelagert und der CFK-Einleger mit einer vereinfachten Kraft, von insgesamt 100 N auf beiden Hauptflächen, über eine Einspannlänge von 25 mm eingeleitet. Die Kraft wird bewusst niedriger gewählt, da in diesem Modell keine nichtlinearen Effekte abgebildet werden können und auch sollen. In Abbildung 5.4 ist die maximale Schubspannung, in einem vergrößert dargestellten Interface-Bereich, abgebildet. Wie erwartet ist zu erkennen, dass der Kraftfluss über den oberen Bereich der seitlichen Flächen erfolgt und dies zu einer Spannungsüberhöhung, wie etwa bei Klebeflächen, führt. Der Spannungsüberhöhungsfaktor, die maximale Schubspannung bezogen auf die nominelle Schubspannung, ist 18, was einem relativ hohen Wert entspricht. Außerdem kann auch gezeigt werden, dass die Stirnfläche der Einleger, vernachlässigt werden kann. Vorteil dieses Auszugsversuches ist es, dass neben dem Stoffschluss, auch der Kraftschluss der hybriden Verbindung, durch das Schrumpfen des thermoplastischen Materials mit berücksichtigt wird. Bei klassischen Schubversuchen aus der Klebetechnik wäre dies nicht möglich. Ein Nachteil ist jedoch, dass kein reiner Materialkennwert, wie etwa die Schubfestigkeit bei einer Klebung, generiert wird. Der ermittelte Wert kann aber sehr gut für den Vergleich unterschiedlicher Vorbehandlungsmethoden herangezogen werden, was das Hauptziel der Untersuchungen ist.

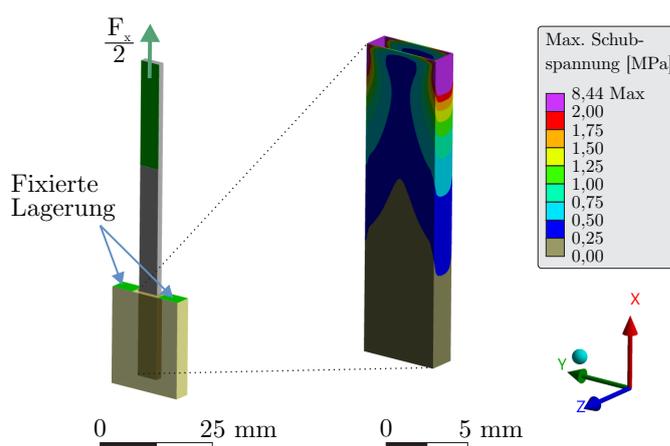


Abb. 5.4: Vereinfachte Berechnung des Schubspannungsverlaufes der Probengeometrie aus dem Hauptversuch v4 mit Randbedingungen (links) und detaillierter Betrachtung der Interface-Region (rechts).

5.2.1 Materialien für die Auszugsversuche

Für die CFK-Struktur wird ein TowPreg der Firma *TCR Composites*, mit einer Epoxidharz-Matrix vom Typ UF3325 und einem 12K Kohlenstofffaserfilament vom Typ T700S der Firma *Toray Composites* verwendet. Das vorimprägnierte Material hat, wie auch die fertigen Einleger, ein Faservolumengehalt von 60 ± 1 %. Als thermoplastisches Material wird ein Polyamid 6 mit 30 Gew.-% Kurzglasfasern genutzt. In den Vorversuchen handelte es sich um das Material *Nylfor B2 GF/30* der *Celanese Corporation*. Für die finale Versuchsreihe wurde das Material *Grodnamid PA6-GF30P-1* des Herstellers *Grodno Khimvolkno* genutzt. Eine detaillierte Übersicht der verwendeten Materialien ist in Tabelle 3.1 zu finden.

Die Wahl des TowPreg-Materials fällt auf eine 12K-Variante, da mit dieser Auswahl im Vergleich zu 24K- und 50K-Filament noch recht filigrane Strukturen gewickelt werden können. Der Matrixtyp weist eine hohe Lagerdauer von 30 Monaten bei -18 °C auf und hat nebenbei noch moderate Aushärtezeiten, ohne zu hochpreisig zu sein.

Die Auswahl des thermoplastischen Materials fällt aus unterschiedlichen Gründen auf ein Polyamid 6 mit Kurzglasfaserverstärkung. Zum einen kann mit der hohen Wasseraufnahme des PA6, der Einfluss von konditionierten Proben sehr gut getestet werden. Zum anderen ist PA6 ein weitverbreiteter technischer Kunststoff, vor allem im Bereich der Strukturbauteile. Die Glasfaserverstärkung von 30 Gew.-% wird gewählt, da das Material neben den Zusatzfunktionen auch strukturell relevant ist. Da die Materialkosten gering bleiben sollen, werden keine Kohlenstofffasern für die Kurzfaserverstärkung genutzt.

Für die Materialien der finalen Versuchsreihe wird eine Materialprüfung durchgeführt, um die Datenblattwerte abzusichern. Für das Spritzgussmaterial werden dafür Probekörper vom Typ 1A nach DIN EN ISO 527-2 im Zugversuch untersucht [147]. Das Material wird im trockenem Zustand direkt im Anschluss an die Herstellung der Probekörper im Zugversuch, mit einer Verfahrensgeschwindigkeit von $v = 2$ mm/min geprüft. Die Ergebnisse sowie die dazugehörigen Werte des Datenblattes, sind in Tabelle 5.3 zu finden. Die Verformung der Probe wird lediglich über den Maschinenweg gemessen. Das gemessene E-Modul liegt ca. 20 % unterhalb des Datenblattwertes, was eine sehr hohe Abweichung darstellt (aufgrund der Messung der Verformung über den Maschinenweg). Die gemessenen Werte der Zugfestigkeit und Bruchdehnung bestätigen jedoch die Qualität des Materials. Beide Werte stimmen mit den Werten des Datenblattes überein und weisen eine sehr geringe Streuung auf.

Tab. 5.3: Ermittelte Kennwerte im Zugversuch für das verwendete PA6GF30 mit dazugehörigen Werten aus dem Datenblatt [148].

	Datenblatt	gemessen
E [GPa]	8200	$6590,5 \pm 136$
R_m [MPa]	155	$155,2 \pm 0,4$
ε [%]	4-5	$4,88 \pm 0,21$

Des Weiteren wird das CFK-Material untersucht. Hier werden mit dem TowPreg-Material Platten gewickelt, aus denen Probekörper ausgeschnitten und geprüft werden [127]. Es werden Probekörper in faserparalleler Richtung, für Vergleichszwecke vom Typ A (15 mm breit und 1 mm dick) und vom Typ B (25 mm breit und 2 mm dick), nach DIN EN ISO 527-5 [130] gefertigt und unter Vakuum bei 132 °C für 4 Stunden ausgehärtet. Laut Norm müssen für die 0°-Prüfung von Probekörpern aus fadengewickelten Prüftafeln, Proben vom Typ A, mit einer abweichenden Dicke von 2 mm, genutzt werden. Aus Referenzgründen zu bisher ermittelten Kennwerten im Labor, werden jedoch ausschließlich die Probekörper vom Typ A mit 1 mm Dicke und vom Typ B mit 2 mm Dicke gefertigt. Eine Ermittlung der Steifigkeit ist in diesem Versuch, aufgrund fehlender Dehnungsmessung, nicht möglich. Bei einer Probekörperbreite von $b_{TypA} = 14,9 \pm 0,03$ mm und einer Dicke von $t_{TypA} = 1,2 \pm 0,01$ mm bzw. einer Breite von $b_{TypB} = 25,3 \pm 0,14$ mm und einer Dicke von $t_{TypB} = 2,5 \pm 0,1$ mm konnten die Ergebnisse in Tabelle 5.4 ermittelt werden. Es ist zu erkennen, dass ausschließlich die Probekörper vom Typ A, mit einer Dicke von 1 mm, die Datenblattwerte nahezu erreicht haben.

Tab. 5.4: Ermittelte Kennwerte des TowPreg Materials (UF3325-T700) für unterschiedliche Probekörpergeometrien nach [127].

	Datenblatt	Gemessen Typ A	Gemessen Typ B
$E_{ }^+$ [GPa]	170	-	-
$R_{ }^+$ [MPa]	2100	$1965,7 \pm 68$	$1522,1 \pm 78$

5.2.2 Fertigung der CFK-Einleger

Als Spritzgusswerkzeug steht ein Universalplattenwerkzeug mit den Abmessungen 80x80x4 mm zur Verfügung. Diese Abmessungen bestimmen somit die maximale Größe der CFK-Einleger. Die Länge der CFK-Einleger wird auf 75 mm festgelegt, um ein einfaches Platzieren der Einleger im Plattenwerkzeug zu gewährleisten. Die Breite der Einleger wird auf die Breite des verwendeten 12K-TowPreg-Materials angepasst, was 5 mm entspricht. Die Dicke der Einleger wird anhand der verwendeten Lagenanzahl ermittelt. Für die unterschiedlichen Versuchsreihen sind dies 1,33 - 1,60 mm (10-12 Lagen). Damit der Prozess der Einleger-Herstellung so nah wie möglich am realen Wickelprozess liegt, werden die Einleger im Wickelprozess gefertigt. Dafür wird ein neuartiges Werkzeug entwickelt, mit Hilfe dessen mehrere Einleger gleichzeitig und reproduzierbar gewickelt werden können (Abbildung 5.5).

Der Grundkörper wird vor dem Wickeln mit Trennmittel behandelt, damit ein einfaches Entformen der Einleger möglich ist. Dazu wird der Grundkörper des Wickelwerkzeuges an der externen Achse befestigt. Zu Beginn bewegt sich der Roboter an den Startblock des Werkzeuges, an welchem der TowPreg-Strang befestigt wird. Jetzt kann das Fadenspannungssystem eingeschaltet werden. Für die Untersuchung des hybriden Interfaces spielt die Fadenspannung keine Rolle, weshalb alle Einleger mit einem

konstanten Wert von 20 N gewickelt werden. Anschließend fährt der Roboter auf den ersten Kanal links neben den Startblock und wickelt die ersten Einleger (Ober- und Unterseite). Im Anschluss bewegt sich der Wickelkopf zum zweiten Kanal und startet erneut mit der Wicklung zweier Einleger. Dies geschieht solange, bis alle Kanäle abgefahren wurden. Danach werden die Stempel auf der Ober- und Unterseite montiert und mit Zwingen leicht fixiert. Erst nachdem alle Einleger gewickelt wurden und die Stempel montiert sind, wird der TowPreg-Strang auf beiden Stirnseiten des Werkzeuges durchtrennt. Dadurch entstehen 20 unabhängige Einleger. Im Anschluss daran werden die Einleger bei 154 °C und -0,95 bar im Vakuumsack und Ofen ausgehärtet. Das Aushärten im Vakuumsack wird gewählt, damit die Kompaktierung bei allen Proben und späteren Demonstratoren konsistent ist. Nach dem Aushärten müssen die Einleger von den Harzresten entgratet werden und können, entsprechend des jeweiligen Versuchs, vorbehandelt werden.

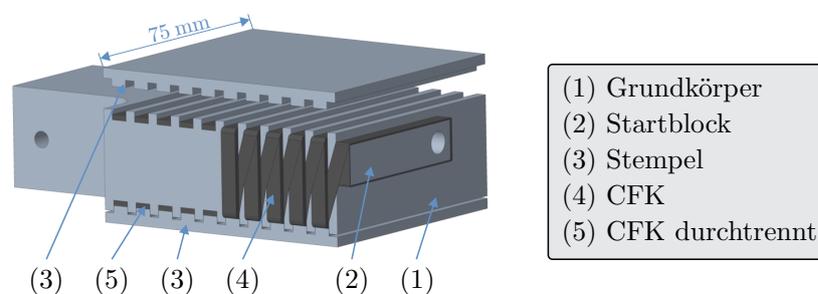


Abb. 5.5: Wickelwerkzeug zur roboterbasierten Herstellung von CFK-Einleger, mit 10 bereits durchtrennten Einlegern (links) und 10 Einlegern vor dem Durchtrennen (rechts) sowie einem montiertem Stempel (unten).

In Abbildung 5.5 sind die ersten 10 Einleger vor und die letzten 10 nach dem Durchtrennen des Materials abgebildet. Der Stempel ist auf der Unterseite montiert dargestellt, auf der Oberseite noch nicht. Mit Hilfe dieses Werkzeuges ist es möglich, roboterbasiert, in einer kurzen Zeit, mit hoher Genauigkeit, eine hohe Anzahl von Einlegern zu fertigen. Abbildung 5.6 zeigt einen fertigen CFK-Einleger.



Abb. 5.6: Gewickelter CFK-Einleger mit den Abmessungen 75x5x1,6mm.

5.2.3 Vorbehandlung der CFK-Einleger

Im Abschnitt 5.1 wurden die Vorteile eines sogenannten Faser-Interfaces aufgezeigt. Um ein solches Interface zu erzeugen eignet sich, wie bereits zuvor in den Abschnitten 2.3.2 und 2.4.4 erläutert, die Niederdruckplasmabehandlung. In diesem Prozess

kann sowohl der Ätzprozess zur Freilegung der Fasern stattfinden, als auch die Aktivierung der Oberfläche und die Einbindung von funktionellen Gruppen zur Erhöhung der Haftung zwischen PA6GF30 und dem CFK. Es werden daher unterschiedlichste Prozessgase und Prozesszeiten im Niederdruckplasma untersucht. Abbildung 5.7 zeigt die Einleger auf dem Bauteilträger in der Plasmakammer, für die Versuche v2 bis v4. Die Bauteilträger werden benutzt, um die Einleger mittig in der Plasmakammer zu platzieren. Die Einleger liegen zwar in der Mitte auf dem Bauteilträger auf, wodurch das Plasma an dieser Stelle nicht wirkt, was allerdings vernachlässigt werden kann, da die CFK-Einleger in diesem Bereich nicht umspritzt werden. Aufgrund der Aktivierung der CFK-Oberfläche werden alle Einleger am Tag nach der Vorbehandlung umspritzt und bis dahin in einer Aluminium-Folie gelagert. Diese schützt die Einleger vor äußeren Einflüssen. Als Referenz dienen für alle Versuchsreihen entfettete Einleger ohne Vorbehandlung sowie zu Beginn der Versuche, auch mechanisch aufgeraute Einleger. Zusätzlich wird die Wirkung eines Universal-Haftvermittlers sowie vorgewärmter CFK-Einleger untersucht.

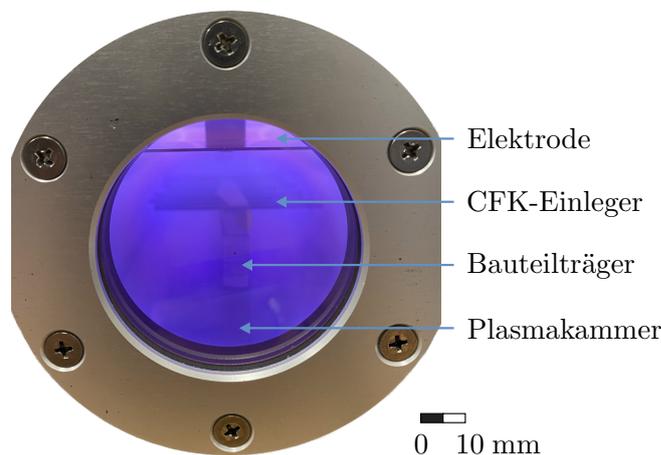


Abb. 5.7: Foto der Plasmakammer mit aktivem Plasma und CFK-Einlegern auf dem Bauteilträger.

5.2.4 Umspritzen der CFK-Einleger

Die Hybridproben werden auf einer Spritzgussmaschine vom Typ *Allrounder 320 S 500-150* des Herstellers *Arburg* gefertigt. Das PA6GF30 Material wird vor dem Verarbeiten getrocknet. Die Düsenheizung der Spritzgussmaschine beträgt 280 °C, die Werkzeugtemperatur 80 °C, die Einspritzgeschwindigkeit 10 mm/s und der Einspritzdruck 450 bar. Wie bereits erwähnt, werden die CFK-Einleger in einem Plattenwerkzeug mit den Abmessungen 80x80x4 mm (LxBxT) umspritzt. Das Werkzeug besitzt einen seitlichen Einspritzpunkt (Abb. 5.8). Damit die CFK-Einleger während des Spritzgussprozesses im Plattenwerkzeug nicht verrutschen, muss ein Platzhalter genutzt werden. Dieser fixiert die CFK-Einleger. Der Platzhalter wurde im Laufe der Versuchsreihen überarbeitet, da er sich als kritisch bei der Herstellung der Hybridproben erwiesen hat.

Bei der Konstruktion der Platzhalter ist darauf zu achten, dass noch genug Spritzgussmaterial für einen sauberen Prozess eingespritzt werden kann. Deshalb besitzen die Aluminiumplatzhalter ein Totvolumen, um das überschüssige Material aufzunehmen. In den folgenden Versuchen wird genauer auf diese Platzhalter eingegangen.

5.3 Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Interface-Festigkeit

In Tabelle 5.5 ist noch einmal ein Überblick über die durchgeführten Versuche mit Herstellungsart, Anzahl der CFK-Lagen im Einleger, Leistung des Plasmagenerators, Material des Platzhalters im Spritzgusswerkzeug, Anzahl der hergestellten Hybrid-Probekörper pro Einspritzung und verwendetem Spritzgussmaterial zu sehen. Bei den Testreihen v1-v3 handelt es sich um die Vorversuche, bei Testreihe v4 um den finalen Hauptversuch. In jeder neuen Versuchsreihe wurde die Geometrie des hybriden Probekörpers leicht angepasst und verbessert. Anhand der Vorversuche werden die Effekte unterschiedlicher Plasmaparameter, insbesondere der Leistung, der Dauer und diverser Prozessgase, deutlich, welche im Hauptversuch nicht in diesem Detailgrad betrachtet werden können. Des Weiteren werden in den Vorversuchen die Besonderheiten bei der Geometrie der Platzhalter im Spritzgussversuch und bei der Gestaltung des Versuchsaufbaus für den Auszugsversuch deutlich.

Tab. 5.5: Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen der Auszugsversuche.

	Test v1	Test v2	Test v3	Test v4
Herstellung	Hand	Roboter	Roboter	Roboter
CFK-Lagen	10	10	10	12
Plasmaleistung	200 & 500 W	90 W	90 W	90 & 100 W
Platzhalter	PTFE	Alu v1	Alu v1	Alu v2
Hybridproben	5	2	2	2
PA6GF30	Nylfor	Nylfor	Nylfor	Grodnamid

Alle Auszugsversuche werden an einer Universalprüfmaschine der Firma *Test* vom Typ *112.20* mit einer Auszugsgeschwindigkeit von 1 mm/s durchgeführt. Die Vorversuche dienen zur iterativen Ermittlung der Plasmaparameter, dem Vergleich mit klassischen Vorbehandlungsmethoden sowie den geometrischen Randbedingungen, wie der Geometrie des Probekörpers, der Platzhalter und dem Werkzeug des Auszugsversuches.

5.3.1 Vorversuch v1

In der ersten Versuchsreihe soll die prinzipielle Machbarkeit für hybride DP-TP Strukturen, mit Hilfe des Vergleichs von unterschiedlichen Oberflächenvorbehandlungen, untersucht werden. Die Herstellung der CFK-Einleger erfolgt händisch mit 10 Lagen ($t = 1,38 \pm 0,06 \text{ mm}$). Als Referenz dient ein mit Aceton gereinigter CFK-Einleger. Es werden Einleger mit 280er Schleifpapier aufgeraut ($R_a = 1,6 \pm 0,2 \mu\text{m}$) und zum Vergleich noch bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ vorgewärmt. Es werden weitere Einleger mit 1200er Schleifpapier gleichmäßig geglättet ($R_a = 0,8 \pm 0,1 \mu\text{m}$), da mit dem Werkzeug der ersten Generation keine gleichmäßige Oberflächenrauigkeit erzeugt werden kann. Zum Vergleich werden diese Einleger mit einem Universal-Primer (*3M 4298*) und mit einem 5-minütigen O_2 Plasma, bei 200 W Leistung, einem Vakuum von $0,3 \text{ mbar}$ und einem Gasfluss von 5 sccm behandelt. Bei diesen Plasmaparametern soll eine Aktivierung der Oberfläche stattfinden. Als Letztes wird eine Einleger-Reihe im Plasmaprozess geätzt. Hierfür wird eine Plasmaleistung von 500 W bei $0,3 \text{ mbar}$ Vakuum und einem Gasfluss von 52 sccm genutzt. Sauerstoffplasma wird dabei als Erstes untersucht, da es ein weitverbreitetes Prozessgas zum Aktivieren und Ätzen ist.

In der ersten Versuchsreihe wird als Platzhalter im Spritzgusswerkzeug eine zweiteilige PTFE-Platte mit Kanälen genutzt, sodass die CFK-Einleger eingelegt und wieder entnommen werden können. Diese ist einfach in der Herstellung und soll für einen Machbarkeitsnachweis genügen. Mit Hilfe dieser Platte können fünf Hybrid-Probekörper hergestellt werden, die an beiden Enden des CFK-Einlegers umspritzt werden (Abb. 5.8).

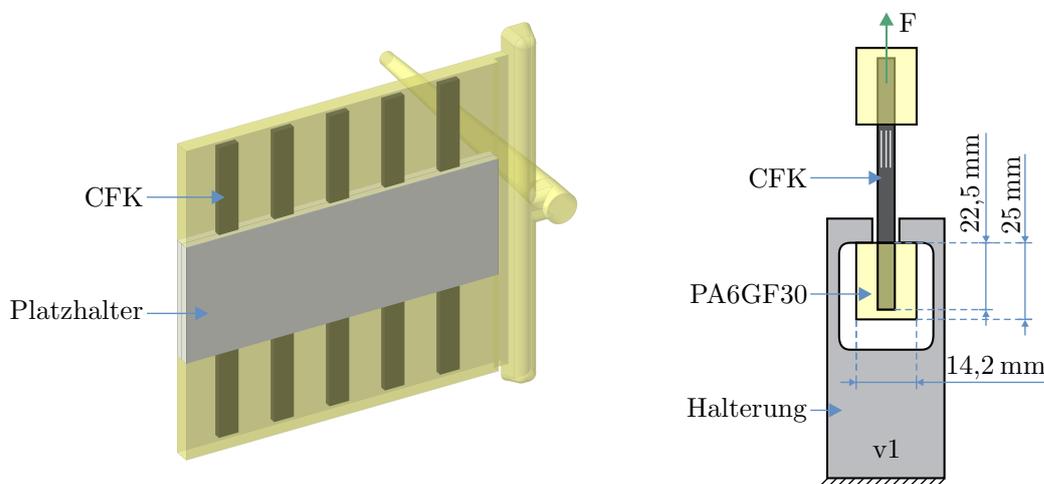


Abb. 5.8: PTFE-Platzhalter (links) und Aufbau des Auszugsversuches mit Hybridproben-Geometrie v1.

Aufgrund der Geometrie des Platzhalters müssen die Probekörper nach dem Umspritzen noch auf die finale Kontur zugeschnitten werden. Die Hybrid-Probe wird anschließend bei der Prüfung an einem Ende geklemmt und am anderen Ende in die neu entwickelte Halterung eingehängt. Diese Halterung ermöglicht es, ohne Klemmkräfte im Bereich des zu prüfenden Interfaces, die gemittelte Schubfestigkeit im Auszugsversuch zu ermitteln.

In Abbildung 5.8 (links) sind der zweiteilige PTFE-Platzhalter, die CFK-Einleger und das Spritzgussmaterial mit Angusskanal dargestellt. In Abbildung 5.8 (rechts) ist der Auszugsversuch mit der dazugehörigen, zugeschnittenen Hybrid-Probe, der neu entwickelten Halterung und den Hauptabmessungen der Hybrid-Probe dargestellt.

Die Ergebnisse in Abbildung 5.9 zeigen einen Anstieg bei nahezu allen Vorbehandlungsmethoden, mit Ausnahme der Probe mit dem Universal-Primer ($\bar{\tau}_{v1-e}$). Dies liegt vermutlich daran, dass die hohen Temperaturen im Spritzgussprozess diesen beschädigt haben. Ein Vorwärmen der CFK-Einleger führt, wie erwartet, zu einer Erhöhung der Interface-Festigkeit ($\bar{\tau}_{v1-c}$). Das Aufrauen ($\bar{\tau}_{v1-b}$) bzw. Glätten ($\bar{\tau}_{v1-d}$) der Einleger führt ebenso zu einer Erhöhung der Interface-Festigkeit. Sie unterscheiden sich jedoch wenig untereinander. Höchste Steigerungen der Anbindung können mit den beiden Sauerstoffplasmabehandlungen erzielt werden. Sowohl ein 5-minütiges Aktivieren ($\bar{\tau}_{v1-f}$), als auch der 30-minütige Ätzprozess ($\bar{\tau}_{v1-g}$), erhöhen die Interface-Festigkeit signifikant um den Faktor 5,9 bzw. 7,6. Anhand dieser Ergebnisse können die Parameter für die zweite Vorversuchsreihe ausgewählt werden.

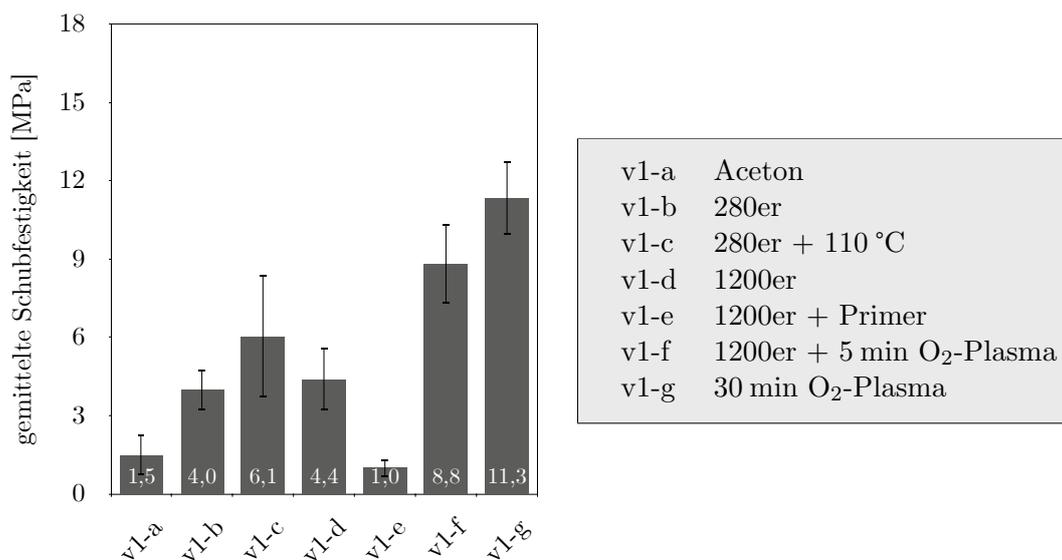


Abb. 5.9: Gemittelte Schubfestigkeit $\bar{\tau}$ der Vorversuche v1.

5.3.2 Vorversuch v2

Anhand der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe konnte die Machbarkeit von hybriden DP-TP Probekörpern gezeigt werden. Aus diesem Grund werden die CFK-Einleger nun mit Hilfe des bereits vorgestellten Wickelwerkzeugs roboterbasiert gefertigt. Dies erhöht die Genauigkeit der Einleger-Dicke bei 10 Lagen auf $t = 1,35 \pm 0,02$ mm. Zusätzlich wird der Platzhalter stark überarbeitet und aus Aluminium gefertigt (Abb. 5.10). Vorteil des neuen Platzhalters ist vor allem die einfache und reproduzierbare Platzierung im Spritzgusswerkzeug. Zusätzlich müssen die Hybridproben nicht mehr zugeschnitten werden,

sondern nur vom Anspritzkanal getrennt werden. Auch wird die zweite hybridisierte Seite der Probekörper nicht benötigt, was eine bessere Klemmung im Auszugsversuch ermöglicht. All diese Maßnahmen sollen zu einem konsistentem Versuch, mit geringen Abweichungen führen.

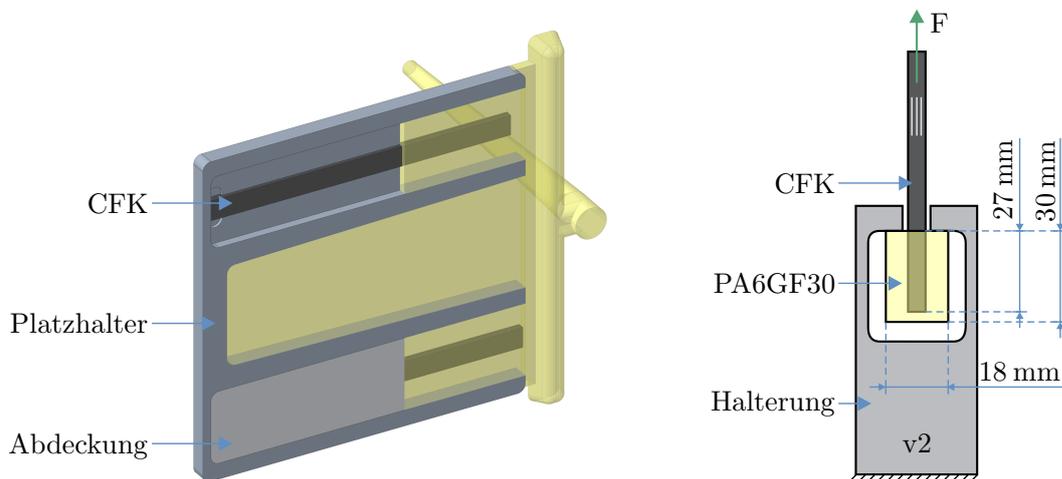


Abb. 5.10: Aluminiumplatzhalter mit Spritzgussgeometrie (links) und überarbeitete Hybridprobegeometrie im Auszugsversuch v2 (rechts).

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zeigen das Potenzial der Niederdruckplasma-behandlung. Aus diesem Grund soll die Untersuchung weiter vertieft werden. Da das Ziel weiterhin die Erzeugung eines Faser-Interfaces ist (siehe Abb. 5.1), wird der Fokus auf den Ätzprozess gelegt. Als Referenz dienen mit Isopropanol gereinigte Einleger. Ab diesem Zeitpunkt werden alle Plasmabehandlungen in der selben Anlage des Herstellers *Diener Electronics* vom Typ *Femto* durchgeführt. Dies ermöglicht gleichbleibende Randbedingungen. Das Vakuum wird auf 0,3 mbar eingestellt und der Plasmagenerator arbeitet bei 40 kHz und 90 % Leistung, also 90 Watt. Da diese Anlage kleiner als in der ersten Versuchsreihe ist, wird die Behandlungsdauer im Sauerstoffplasma (Sauerstoff 2.8) auf 75 und 90 Minuten erhöht. Zusätzlich werden noch 90-minütige Einleger im Ofen auf 110 °C vorgewärmt, oder mit einem zusätzlichen 10-minütigen Luft- (Umgebungs-luft) oder Stickstoffplasma (Stickstoff 4.0) behandelt. Die zusätzliche Behandlung mit Luft und Stickstoff soll neben den sauerstoffhaltigen, auch stickstoffhaltige funktionelle Gruppen einbringen. Als Letztes wird noch ein 90-minütiger Ionenätzprozess (RIE, siehe Absatz 2.3.2) durchgeführt. Dabei werden die CFK-Einleger für jeweils 45 Minuten mit jeder der beiden Hauptflächen, direkt auf die Kathode gelegt, was die Ätzrate weiter erhöht.

In Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse des zweiten Vorversuches dargestellt. Es wurden jeweils 8 Hybridproben geprüft. Es ist zu erkennen, dass alle Plasmabehandlungen zu einer starken Erhöhung der Interface-Festigkeit führen. Alle Ergebnisse liegen auf einem sehr ähnlichen Niveau, mit relativ hohen Schwankungen innerhalb der Versuchsreihe.

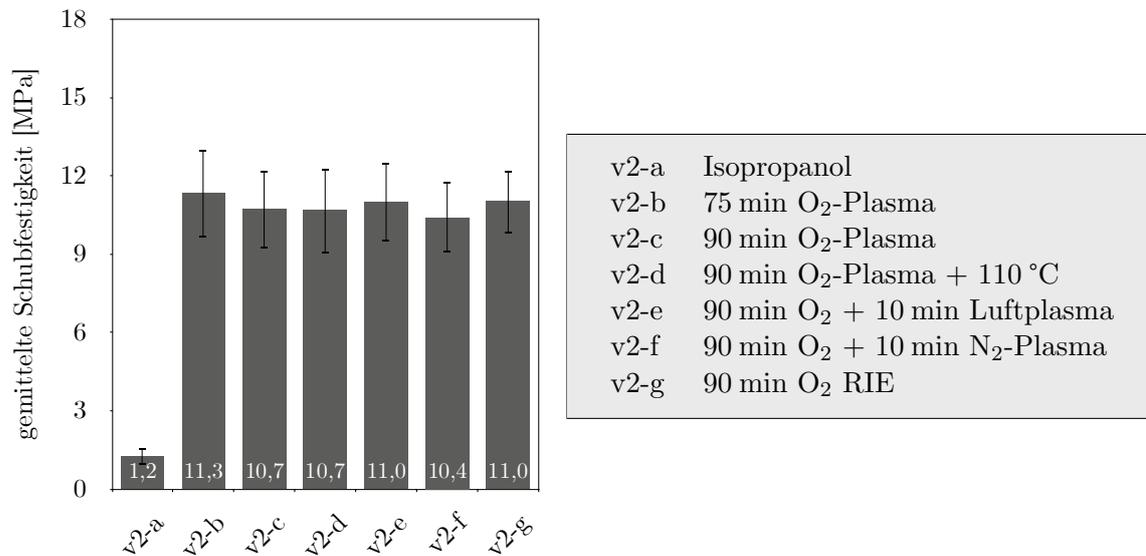


Abb. 5.11: Gemittelte Schubfestigkeit $\bar{\tau}$ der Vorversuche v2.

Wegen der langen Behandlungsdauer von 90 Minuten kommt es teilweise zu einer Abschaltung der Plasmaanlage, da diese überhitzt. Eine 90-minütige Plasmabehandlung ($\bar{\tau}_{v2-c}$) verschlechtert die gemessene Interface-Festigkeit, gegenüber einer 75-minütigen Behandlung ($\bar{\tau}_{v2-b}$). Somit zeigt eine zu lange Behandlungsdauer mit Sauerstoffplasma, eine Beschädigung der C-Fasern und ein Herabsinken der Oberflächenenergie, insbesondere den polaren Anteil [100]. Das Vorwärmen der Einleger zeigt keinen Effekt ($\bar{\tau}_{v2-d}$). Grund dafür sind die neuen Platzhalter aus Aluminium. Es ist nicht möglich, die CFK-Einleger schnell genug in die Platzhalter zu legen und im Spritzgusswerkzeug zu platzieren, ohne dass die CFK-Einleger wieder abkühlen. Eine zusätzliche Behandlung mit Luftplasma ($\bar{\tau}_{v2-e}$) könnte einen Effekt haben. Dies muss in weiteren Versuchen untersucht werden. Die zusätzliche Behandlung mit Stickstoff-Plasma ($\bar{\tau}_{v2-f}$) führt eher zu einem Absinken der Auszugskraft. Beim 2x45-minütigen RIE-Prozess ($\bar{\tau}_{v2-g}$) kann eine sehr starke Aufheizung der Plasmaanlage beobachtet werden. Des Weiteren gibt es Rückstände des Matrix-Materials auf der Elektrode. Im Vergleich zur normalen Niederdruckplasmabehandlung mit Sauerstoff, kann hier nur eine sehr geringe Steigerung der Auszugskraft festgestellt werden.

Aufgrund der sehr eng beieinander liegenden Ergebnisse, mit einer gleichzeitig hohen Standardabweichung, werden weitere Untersuchungen durchgeführt. Des Weiteren sind die Versagensarten im Auszugsversuch innerhalb einer Parameterreihe nicht konsistent und auch das Spritzgussbild ist inkonsistent. In Abbildung 5.12 ist zu erkennen, dass die Probekörper teilweise im Auszugsversuch verkippen (701 und 728) und dementsprechend nicht herausgezogen, sondern vielmehr seitlich herausgebrochen werden. Auch ist bei den Probekörpern 701, 725 und 728 eine kleine Fehlstelle zu erkennen, bei der die CFK-Einleger nicht vollständig umspritzt wurden. Es wird vermutet, dass beide Probleme auf dieselbe Ursache zurückzuführen sind, nämlich ein Verkippen der CFK-Einleger im Spritzgussprozess. Bei Probekörper 721 kam es zu einem Versagen des

CFK-Materials, was auf die Einspannstelle zurückzuführen ist und zusätzlich ist auch ein Riss im Polyamid zu erkennen, was auch auf ein leichtes Verkippen hindeutet.

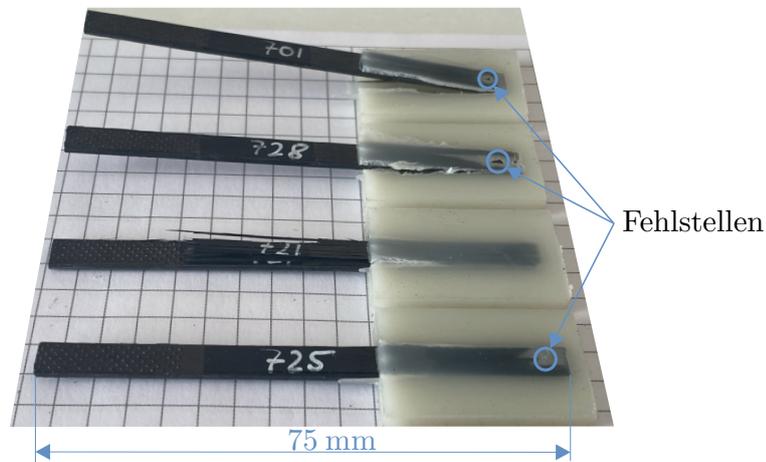


Abb. 5.12: Auswahl getesteter Proben der Versuchsreihe v2-d mit markierten Fehlstellen.

5.3.3 Vorversuch v3

Aufgrund der bisher erzielten Ergebnisse wird versucht, ein konsistentes Versagen der hybriden Probekörper zu erreichen, um genauere Aussagen zur Effektivität einzelner Plasmabehandlungen zu treffen. Dafür werden die CFK-Einleger im Werkzeug neu platziert, direkt am Angusskanal, damit die Stirnseite der CFK-Einleger nicht umspritzt wird und eine bessere Zentrierung der Einleger ermöglicht wird. Dadurch vergrößert sich auch die Interface-Fläche. In Abbildung 5.13 ist die neue, leicht abgeänderte Hybridprobengeometrie im Auszugsversuch zu erkennen.

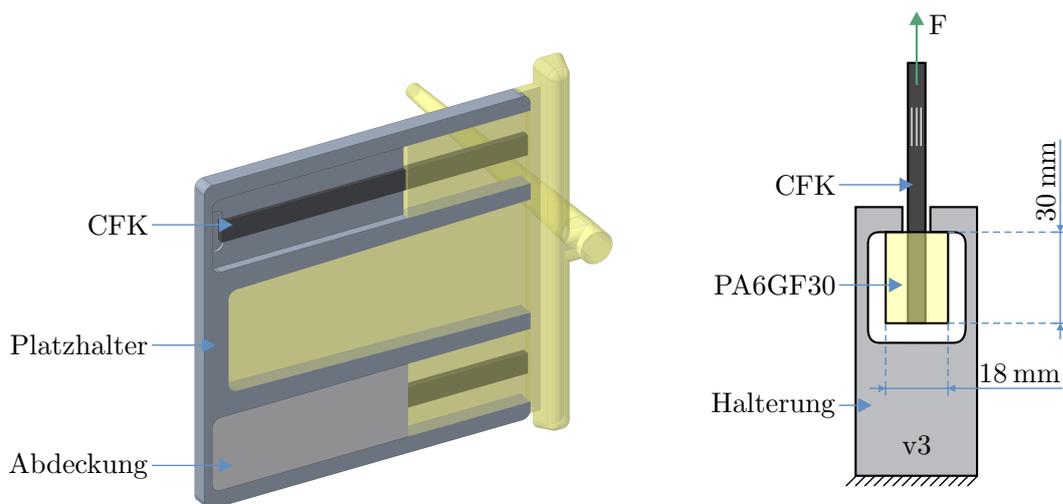


Abb. 5.13: Aluminiumplatzhalter mit verschobenen CFK-Einlegern und Abdeckung (links) und leicht überarbeitete Hybridprobengeometrie im Auszugsversuch v3 (rechts).

Die Behandlungsdauer wird in dieser Versuchsreihe verringert, um eine Beschädigung der CFK-Einleger im Plasmaprozess zu verhindern, was die herabgesetzte Interface-Festigkeit im Vorversuch v2 vermuten lässt. Außerdem wird der Einfluss des groben mechanischen Aufrauens mit Hilfe einer Raspel-Feile untersucht. Dieser Einleger wird nach dem Aufrauen zusätzlich mit einem 15-minütigen Sauerstoffplasma behandelt. Aufgrund der inkonsistenten Versagensbilder in Versuchsreihe v2 wird die nachträgliche Behandlung mit Stickstoffplasma noch einmal geprüft. Mit Hilfe eines Argon-Plasmas wird untersucht, welche Rolle die funktionellen Gruppen spielen. Da Argon ein Edelgas ist, führt dies im Plasmaprozess zu einem rein physikalischen Ätzprozess (kein zusätzliches chemisches Ätzen, wie etwa bei Sauerstoffplasma). Dadurch werden keine funktionellen Gruppen an der Oberfläche erzeugt, sondern lediglich freie Radikalstellen [35].

In Abbildung 5.14 sind die Ergebnisse des zweiten Vorversuches dargestellt, bei welchem jeweils fünf Hybridproben geprüft wurden. Auch hier lässt sich eine allgemeine Erhöhung der Interface-Festigkeit, durch die Vorbehandlung mit Niederdruckplasma belegen.

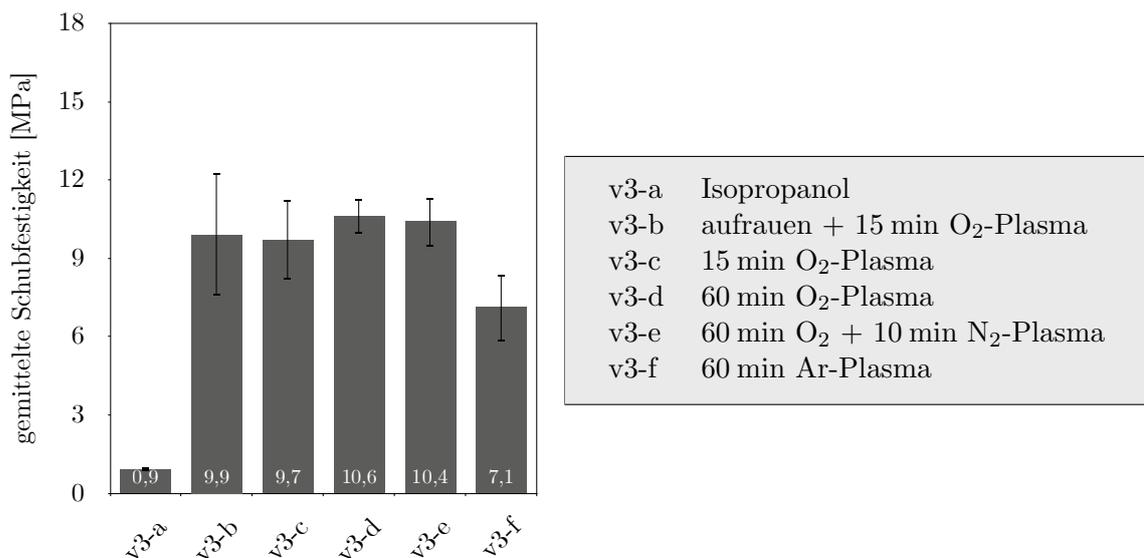


Abb. 5.14: Gemittelte Schubfestigkeit $\bar{\tau}$ der Vorversuche v3.

Es ist zu erkennen, dass ein Aufrauen der CFK-Einleger ($\bar{\tau}_{v3-b}$) keinen signifikanten Einfluss auf die Interface-Festigkeit hat. Dies bedeutet, dass das Aufrauen und damit die Erzeugung von Mikroformschlüssen, einen sehr geringen Effekt aufweist. In Kombination mit den Ergebnissen aus den ersten beiden Versuchsreihen kann nachgewiesen werden, dass vor allem die Aktivierung der Oberfläche mit funktionellen Gruppen, die Interface-Festigkeit steigert. Dies bestätigt auch der Vergleich der 15- und 60-minütigen Behandlung im Sauerstoffplasma ($\bar{\tau}_{v3-c}$ & $\bar{\tau}_{v3-d}$). Der Unterschied beider Einleger besteht vor allem in der stärkeren Freilegung der C-Fasern, was später noch gezeigt wird. Trotzdem sind die Werte der gemittelten Schubfestigkeit bei beiden Probekörpern recht nah beieinander. Zusätzlich wird diese Aussage durch die Behandlung mit Argonplas-

ma gestützt ($\bar{\tau}_{v3-f}$). Hier werden alle Effekte der Sauerstoffbehandlung betrachtet, außer die Erzeugung von funktionellen Gruppen und das chemische Ätzen. Die ermittelten Schubfestigkeitswerte sind hier um 33 % niedriger als bei einer gleichlangen Sauerstoffbehandlung. Der nicht vorhandene Nutzen einer zusätzlichen Stickstoffplasmabehandlung aus Versuchsreihe v2, also dem Aufbringen von funktionellen Gruppen auf Basis von Stickstoff, konnte hier bestätigt werden ($\bar{\tau}_{v3-e}$).

Die Anpassung der hybriden Probengeometrie verbesserte das Schadensbild der Auszugsversuche nur geringfügig, weshalb es trotzdem zu einem unerwünschtem Verkippen der Probekörper kommt. Aus diesem Grund wird für den Hauptversuch die Geometrie ein weiteres Mal durch einen neuen Platzhalter angepasst. Zusätzlich wird auch noch die Halterung im Auszugsversuch überarbeitet, um die Nachteile der Vorversuche im Auszugsversuch zu beheben.

5.3.4 Fazit der Vorversuche

In Abbildung 5.15 sind die Ergebnisse aller Vorversuche noch einmal zusammengefasst. Es ist zu erkennen, dass eine Niederdruckplasmabehandlung, unabhängig von Prozessgas und -dauer, zu einer signifikanten Erhöhung der Schubfestigkeit, im Vergleich zu lediglich gereinigten Proben (vX-a), führt. Es ist aber auch zu erkennen, dass keine klare Aussage getroffen werden kann, welche Behandlung bei welchem Parametern am besten geeignet ist. Dies liegt an den hohen Standardabweichungen der einzelnen Versuche und dem identischen Wertebereich ($\bar{\tau} \approx 10 - 11$ MPa) der Ergebnisse, was unter anderem auf das Versagensverhalten im Auszugsversuch zurückzuführen ist.

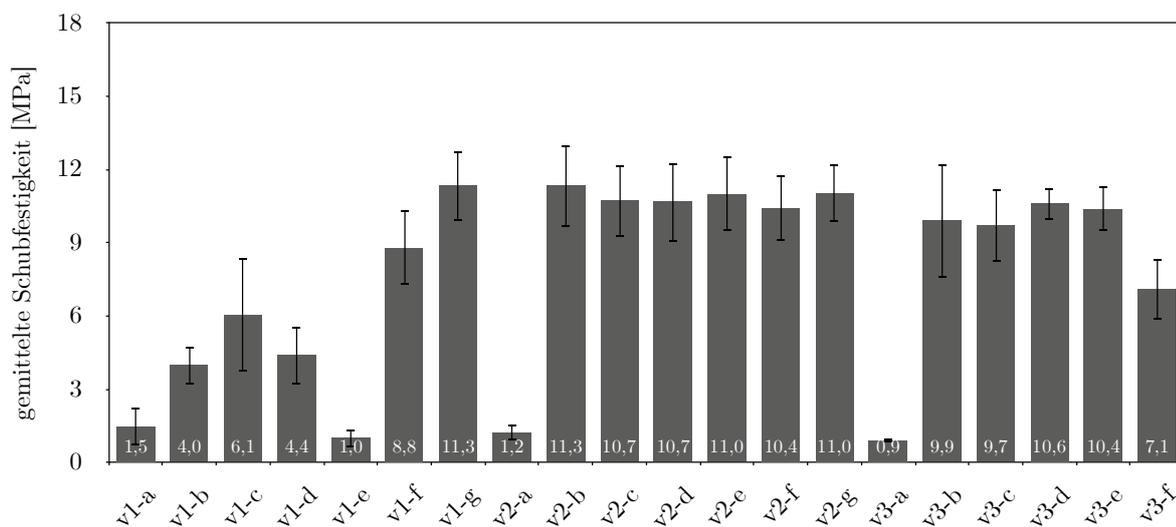


Abb. 5.15: Gemittelte Schubfestigkeit $\bar{\tau}$ samt Standardabweichung als Ergebnis der Auszugsversuche aller Vorversuche.

Die höchste Steigerung der Interface-Festigkeit, im Bezug zur Referenzprobe, kann in den Vorversuchen durch eine 60-minütige Sauerstoffplasmabehandlung in Versuchsreihe

v3 erzielt werden. Hier kann die Interface-Festigkeit um den Faktor 11,7 gesteigert werden. Die Absolutwerte waren in der Versuchsreihe v2 zwar höher, aufgrund der Geometrieanpassung der einzelnen Versuche muss jedoch in jeder Versuchsreihe die dazugehörige Referenz genutzt werden (welche in v2 höher war).

5.3.5 Hauptversuch v4

Mit dem Wissen aus den Ergebnissen der Vorversuche wird als Erstes im Hauptversuch, die hybride Probengeometrie angepasst. Damit die CFK-Einleger im Spritzgussprozess nicht verkippen wird die Lagenanzahl von 10 auf 12 Lagen (Einleger-Dicke $t = 1,60 \pm 0,04$ mm) erhöht, um die Biegesteifigkeit zu verbessern. Zusätzlich wird die umspritzte Länge und damit auch die freie Länge der CFK-Einleger im Platzhalter, von 27 mm im Versuch v2, auf 20 mm verringert. Beide Effekte führen zu einer Erhöhung der Biegesteifigkeit des CFK-Einlegers, beim Umspritzen, um ca. 75 %.

Außerdem wird die Halterung im Auszugsversuch angepasst. Diese ist nun auf der Rückseite geschlossen und wird zusätzlich von vorne mit einer Abdeckung (nicht dargestellt) verschlossen. Das Polyamid des hybriden Probekörpers hat, im eingebauten Zustand, zu beiden Abdeckungen einen Abstand von ca. 0,1 mm. Somit wirken keine zusätzlichen Kräfte auf die Interface-Fläche. Es verhindert aber, dass die Probe, wie in den vorherigen Versuchen, kippen kann und das CFK seitlich herausgerissen wird. In Abbildung 5.16 sind der überarbeitete Platzhalter, sowie der aktualisierte Auszugsversuch samt hybridem Probekörper zu sehen.

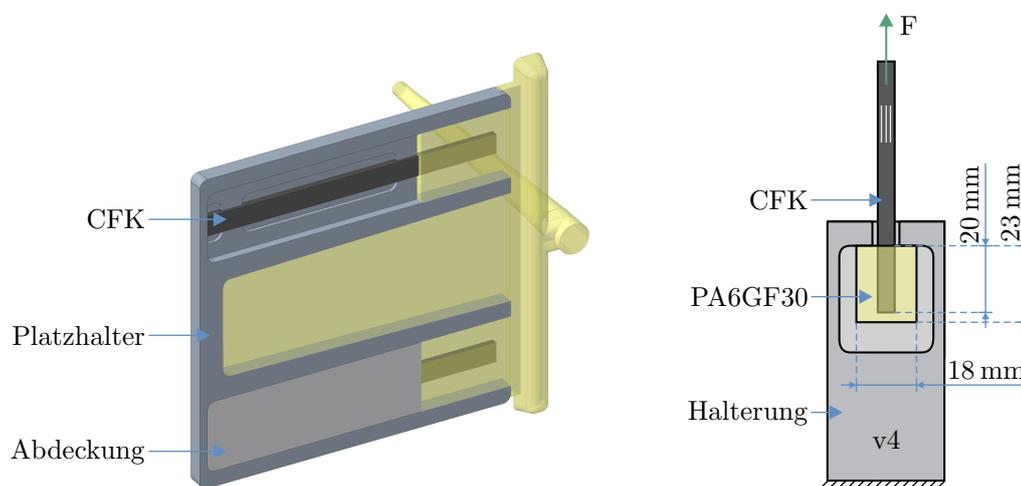


Abb. 5.16: Überarbeiteter Aluminiumplatzhalter mit Spritzgussmaterial und Abdeckung (links), sowie neue Hybridprobengeometrie mit geschlossener Halterung im Auszugsversuch v4 (rechts).

Die Effektivität der gezeigten Maßnahmen kann anhand der nun konsistenten Bruchbilder bestätigt werden. Es kommt nicht mehr zum Verkappen der Probekörper. In Abbildung 5.17 ist der Vergleich zwischen einem, nun gewünschtem Versagen der Probe 110 und eines, unerwünschten seitlichen Herausreißen des Probekörpers 737 aus

der Versuchsreihe v3, zu sehen. In Probe 110 wird der CFK-Einleger entlang seiner Längsachse herausgezogen, bis die Verbindung versagt. Am Spritzgussmaterial bleiben lediglich einige Faserreste zurück.



Abb. 5.17: Versagensbild des Vorversuches v3 (oben) im Vergleich mit dem im Hauptversuch erreichtem Versagen (unten).

Im Hauptversuch werden jeweils neun Hybridproben getestet. Neben der gereinigten Referenzprobe wird eine 15-minütige Sauerstoffplasmabehandlung zum Vergleich mit der vorherigen Versuchsreihe untersucht. Zusätzlich findet für diese Behandlungsdauer eine Konditionierung der hybriden Probe bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte statt. Die Proben werden so lange in der Klimakammer gelagert und wöchentlich gewogen, bis die Änderung der Gewichtszunahme $\Delta m \leq 0,1$ % pro Woche beträgt. Dies ist nach 92 Tagen der Fall. Des Weiteren werden Einleger bei 45-minütiger Sauerstoffbehandlung im klassischen und im RIE-Verfahren sowie im Luftplasma untersucht. Das Luftplasma soll die Vorteile der Sauerstoff- und Stickstoffplasmen vereinen und hat gleichzeitig den Vorteil, dass keine zusätzlichen Gaszylinder und Druckminderer für den Betrieb der Anlage benötigt werden. Die Luft wird aus der Umgebung durch ein Vlies angesaugt, welches Schmutzpartikel fernhält. Zum Schluss wird eine 70-minütige Sauerstoffplasmabehandlung durchgeführt, sowohl bei den bisherigen 90 Watt Generatorleistung, aber auch bei 100 Watt Leistung.

In Abbildung 5.18 sind die Ergebnisse dargestellt. Erste Erkenntnisse können bei Betrachtung der Referenzprobe gewonnen werden. Im Vergleich zu den beiden vorherigen vergleichbaren Versuchen, ist die gemittelte Schubfestigkeit $\bar{\tau}$ ungefähr doppelt so hoch ($\bar{\tau}_{v4-a} = 2,2 \pm 0,5$ MPa, $\bar{\tau}_{v2-a} = 1,2 \pm 0,3$ MPa, $\bar{\tau}_{v3-a} = 0,9 \pm 0,1$ MPa). Dies liegt hauptsächlich an der angepassten CFK-Geometrie, da es bei den niedrigen Auszugskräften bisher nicht zu einem Verkappen der Referenzproben kam, aber auch an der anderen Schubspannungsverteilung durch die kürzere Umspritzungslänge. Des Weiteren ist erkennbar, dass der Mittelwert aller Versuchsreihen oberhalb von 12,5 MPa liegt, was in allen Vorversuchen nicht der Fall war. Dies zeigt, dass die getroffenen Verbesserungen innerhalb der Hauptversuche funktionieren.

Die Feuchtigkeit hat, wie erwartet, einen Einfluss auf das Interface und verringert die Belastbarkeit des hybriden Interfaces um ca. 6 % ($\bar{\tau}_{v4-c}$). Die Erhöhung der Behandlungsdauer von 15 auf 45 Minuten ($\bar{\tau}_{v4-b}$ & $\bar{\tau}_{v4-d}$) hat nur einen äußerst geringen, nicht signifikanten Effekt auf die gemittelte Schubfestigkeit, obwohl die Fasern weiter freigelegt werden, was in Abschnitt 5.4 gezeigt wird. Die Behandlung im RIE-Prozess ($\bar{\tau}_{v4-e}$) zeigt eine durchaus relevante Verringerung der Interface-Festigkeit, weshalb diese nicht für die Erzeugung eines hybriden Interfaces empfohlen wird.

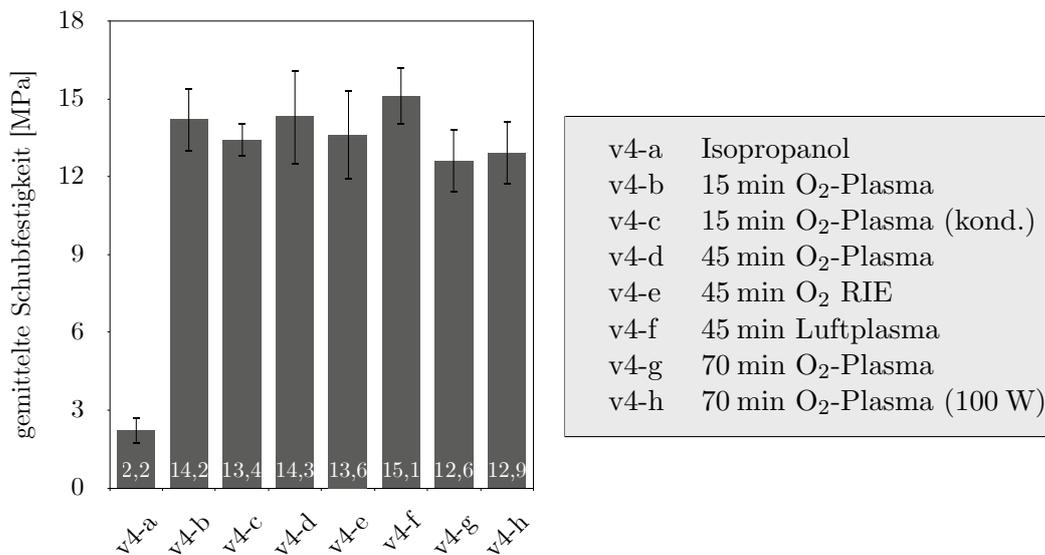


Abb. 5.18: Gemittelte Schubfestigkeit $\bar{\tau}$ der Hauptversuche v4.

Auch die Erhöhung der Behandlungsdauer auf 70 Minuten ($\bar{\tau}_{v4-g}$) verschlechtert die Interface-Festigkeit im Vergleich zur 15- oder 45-minütigen Behandlung. Die Erhöhung der Plasmageneratorleistung von 90 auf 100 Watt ($\bar{\tau}_{v4-h}$) zeigt eine geringfügige Verbesserung der Ergebnisse, welche aber immer noch unterhalb der kürzeren Behandlungsdauer liegt. Die besten Ergebnisse konnten bei einer 45-minütigen Niederdruckplasmabehandlung mit Luft ($\bar{\tau}_{v4-f}$) generiert werden. Die gemittelte Schubfestigkeit liegt hier bei $\bar{\tau}_{v4-f} = 15,1 \pm 1,1$ MPa, was eine Steigerung um den Faktor 6,9 im Vergleich zur Referenzprobe $\bar{\tau}_{v4-a}$ bedeutet. Diese geringere Steigerung, im Vergleich zur Steigerung im Vorversuch v3, liegt daran, dass die Referenzwerte im Hauptversuch höher sind.

5.4 Untersuchung der Probekörper

Mit Hilfe eines konfokalem 3D-Laserscanning-Mikroskops der Firma *KEYENCE* wird im ersten Schritt die Oberfläche der CFK-Einleger vor dem Umspritzen untersucht. Mit diesem Mikroskop lassen sich zum einen Bilder zum optischen Vergleich erzeugen, zum anderen aber auch die Oberflächenrauigkeit optisch messen. In Abbildung 5.19 sind die Aufnahmen der Hauptversuchsreihe v4 für die gereinigten Referenz-Einleger, einer 15- und 45-minütigen Sauerstoffplasmabehandlung sowie einer 45-minütigen Luftplasmabehandlung zu sehen.

Optisch ist, wie erwartet, zu erkennen, dass beim Referenz-Einleger nahezu keine Fasern freigelegt werden und die Oberfläche von Matrix-Material dominiert wird. Nach der 15-minütigen Sauerstoffplasmabehandlung sind immer noch viele Matrix-Reste vorhanden. Diese scheinen aber nur eine geringe Dicke aufzuweisen, da die darunterliegenden C-Fasern fast vollständig sichtbar sind. Es wird somit angenommen, dass der Ätzprozess bereits angefangen hat, jedoch nicht vollkommen beendet ist. Nach 45 Minuten

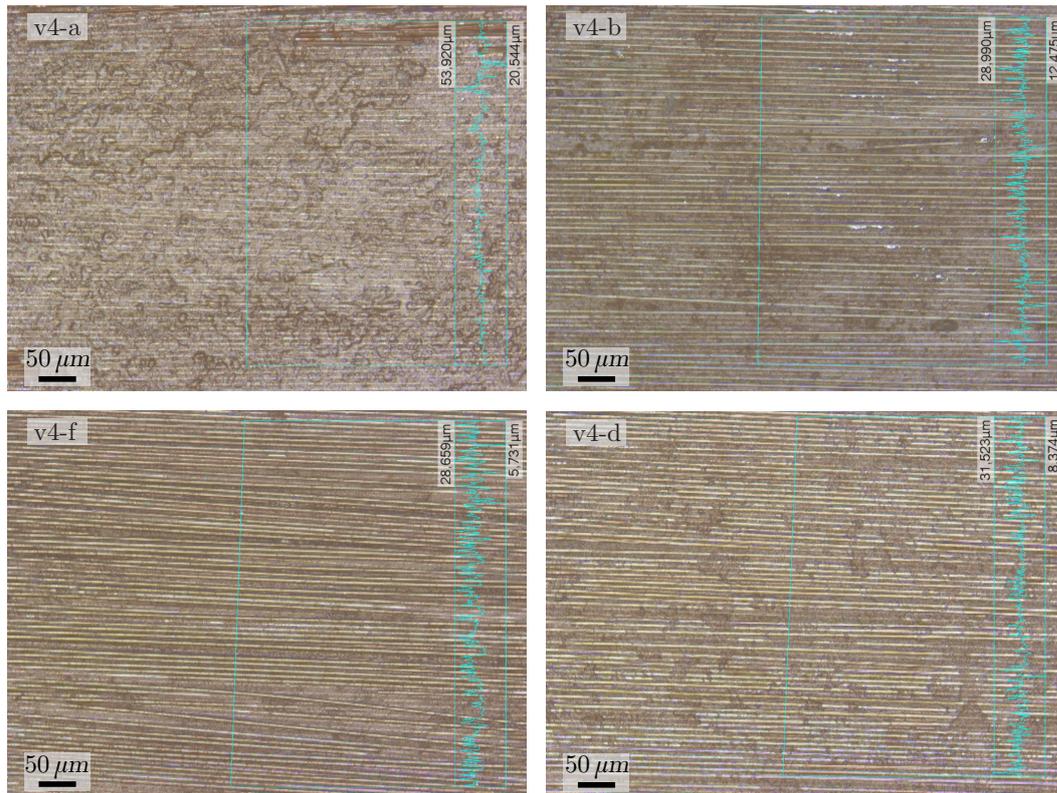


Abb. 5.19: Aufnahmen der CFK-Einleger der Versuchsreihe v4-a (Isopropanol), v4-b (15 min O_2 Plasma), v4-d (45 min O_2 Plasma) und v4-f (45 min Luftplasma) mittels Laser-Mikroskopie und den jeweiligen Rauheitsprofilen mit Minimal- und Maximalwert.

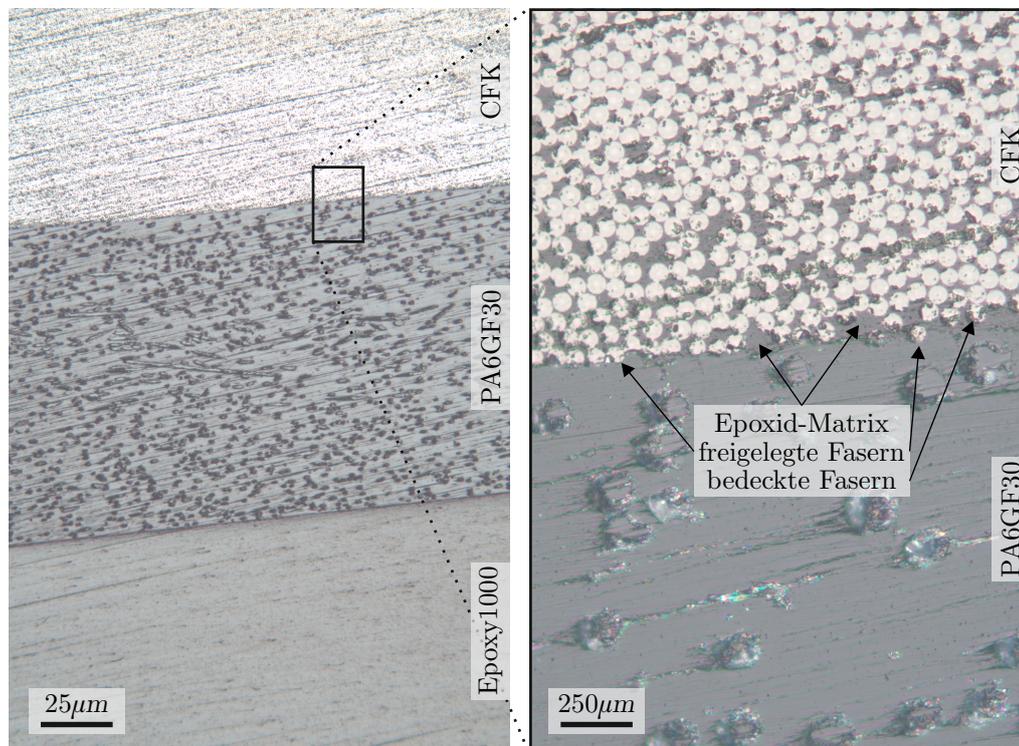
sind nur noch wenige Harz-Reste vorhanden. An vielen Stellen hat schon ein Freilegen der C-Fasern stattgefunden, was ein Faser-Interface ermöglicht. Nach 45-minütiger Behandlung mit Luftplasma sind nahezu keine Matrix-Reste mehr vorhanden und alle Fasern sind freigelegt. Dies bedeutet, dass das Luftplasma, bei gleicher Behandlungsdauer, die Faser besser freilegt, als ein Sauerstoffplasma. Der Unterschied in der ermittelten Schubfestigkeit zwischen den drei plasmabehandelten Einlegern ist zwar messbar vorhanden, aber weitaus geringer als mit den erzeugten Bildern vermutet. Dies stützt die oben erwähnte These, dass vor allem die funktionellen Gruppen für die Interface-Festigkeit verantwortlich sind und weniger der Mikroformschluss an den freigelegten C-Fasern.

Anhand des Mittenrauwertes R_a (Tabelle 5.6) kann keine Aussage über die jeweilige Ätzwirkung getroffen werden, da dieser keinem erkennbarem Muster folgt. Die gemittelte Rautiefe R_z ist für die Referenz-Einleger am höchsten. Dies lässt vermuten, dass keine gleichmäßige Matrix-Schicht an der Oberfläche der CFK-Einleger vorhanden ist, trotz sehr guter Werkzeugoberfläche. Die Werte, für die im Niederdruckplasma behandelten Proben, sind erst niedriger, steigen aber bei verlängerter Behandlungsdauer wieder an. Somit lässt sich kein Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten der Rauigkeit und der Plasmabehandlung ziehen.

Tab. 5.6: Ermittelte Rauigkeit der plasmabehandelten CFK-Einleger inkl. der verwendeten Messstrecke auf dem Einleger.

Vorbehandlung	R_z [μm]	R_a [μm]	Messstrecke [μm]
v4-a (Ref.)	17,753	1,608	462,4
v4-b (15 min O ₂)	6,784	0,834	468,5
v4-d (45 min O ₂)	9,600	1,240	485,6
v4-f (45 min Luft)	10,785	1,852	494,5

In Abbildung 5.20 ist eine Schliiffprobe der hybriden Probe der Versuchsreihe v4-c (konditionierte 15 min O₂-Plasma Probe) dargestellt. Die Probe wird nach dem Spritzgießen in einer Einbettmasse vom Typ *Epoxy 1000* des Herstellers *Cloeren Technology* platziert und ausgehärtet. Die Oberfläche wird schrittweise geschliffen und poliert. Die Untersuchung erfolgt anschließend an einem Digitalmikroskop *DMI5000 M* mit einer Kamera *DMC5400* des Herstellers *Leica Microsystems*. Die Aufnahme auf der linken Seite zeigt die Stirnfläche der Einbettmasse, das PA6GF30 mit den unterschiedlich orientierten Kurzglasfasern sowie den CFK-Einleger. Die rechte Seite zeigt detaillierter den auf der linken Seite hervorgehobenen Bereich des hybriden Interfaces.

**Abb. 5.20:** Aufnahmen einer hybriden Probe (v4-c - konditionierte 15 min O₂-Plasma Probe) im Lichtmikroskop mit Details zur hybriden Grenzfläche (rechts).

In der detaillierten Ansicht (rechts) sind unterschiedliche Bereiche zu erkennen. Auf der linken Seite zeigen sich hauptsächlich teilweise freigelegte C-Fasern, welche mit anderen C-Fasern, PA6-Material, wie auch der Epoxy-Matrix in Kontakt stehen. In der Mitte sind kleine Harznester erkennbar, in denen keine C-Fasern vorhanden sind. Auch sind hier weitere, fast vollständig freigelegte C-Fasern zu erkennen. Im rechten Bildbereich sind noch bedeckte Fasern sichtbar, welche nicht freigelegt sind. Diese Aufnahme bestätigt die oben getroffene Annahme, dass bei einer 15-minütigen Sauerstoffplasma-behandlung, der Ätz-Prozess nicht vollständig abgeschlossen ist.

5.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass es mit Hilfe einer Vorbehandlung von CFK-Einlegern im Niederdruckplasma möglich ist, epoxidharzbasierte UD-CFK-Einleger und kurzglasfaserverstärktes Polyamid 6, im Spritzgussprozess, belastbar miteinander zu verbinden. Die erzeugte Verbindung mit einer 45-minütigen Luftplasma-behandlung hat, mit einer gemittelten Schubfestigkeit von $\bar{\tau}_{v4-a} = 15,1 \pm 1,1$ MPa, eine Festigkeit im unteren Bereich von strukturellen Klebungen. Dabei blieben nach dem Auszugsversuche teilweise Kohlenstofffaserreste am PA6 zurück. Es konnte erfolgreich ein Faser-Interface erzeugt werden, wobei dieses im Bezug auf die Interface-Festigkeit eher wenig Relevanz zeigt. Wichtiger ist die Behandlung mit einem Plasmagas, welches funktionelle Gruppen, vorzugsweise auf der Basis von Stickstoff und Sauerstoff, erzeugt.

Des Weiteren wurde ein Auszugsversuch vorgestellt, mit Hilfe dessen, umspritzte CFK-Einleger auf ihre Interface-Festigkeit untersucht werden können. Dazugehörige CFK-Einleger können mit dem hier gezeigten neuartigen Werkzeug, reproduzierbar und wickelgerecht im roboterbasierten 3D-Faserwickelverfahren hergestellt werden.

Kapitel 6

Anisotropes Strukturbauteil

Nachdem die computerbasierte Erstellung der Wickelmuster sowie die Funktionen der roboterbasierten Wickelanlage gezeigt wurden, wird im folgenden Kapitel der bereits beschriebene Demonstrator im roboterbasierten 3D-Wickelfahren gefertigt und geprüft. Dabei wird auf die Besonderheiten des Verfahrens in Bezug auf die Bauteilqualität eingegangen und das Strukturbauteil auf seine spezifische Steifigkeit mit anderen Fertigungsverfahren verglichen. Der Brakebooster wird dabei in diesem Kapitel nicht umspritzt.

6.1 Beschreibung des Strukturbauteils

Als Strukturbauteil dient der in *Kapitel 4* vorgestellte Brakebooster, welcher zu späteren Vergleichszwecken, ohne eine Hybridisierung durch das Spritzgussverfahren gefertigt und getestet wird. Die relevante Größe ist hierbei die spezifische Steifigkeit c des Bauteils, also die Steifigkeit im Zugversuch, ermittelt über die Sekante im Kraft-Weg Diagramm, bezogen auf die Masse.

$$c = \frac{\frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1}}{m}. \quad (6.1)$$

Im Zugversuch werden die beiden Schenkel des Brakeboosters in der Ebene auseinandergezogen (Siehe Abb. 4.2). Dieser Lastfall diente auch zur anisotropen Topologieoptimierung des Bauteils, die am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW), nach *Mehl et al.* [23] durchgeführt wurde.

Der hier verwendete Brakebooster weicht von der Originalgröße eines Brakeboosters, von ca. 130 mm Höhe und ca. 120 mm Breite, ab und ist um ca. 1/3 kleiner. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der anisotrop topologieoptimierte Brakebooster zu einem späteren Zeitpunkt mit dem hybrid topologieoptimierten Brakebooster verglichen wer-

den soll. Dieser darf aufgrund des vorhandenen Spritzguss-Plattenwerkzeuges die Abmessungen 80x80x4 mm nicht überschreiten. Damit eine Vergleichbarkeit beider Konzepte gegeben ist, sollen beide Varianten des Brakeboosters die gleichen Nennabmessungen aufweisen. Der horizontale Abstand der Lasteinleitungselemente beträgt dabei, nach der Skalierung, 59,4 mm. Anhand der aufgewickelten Materialmenge ergibt sich eine Außenabmessung von ca. 78 mm in der Breite und ca. 76 mm in der Höhe. Die Masse des Brakeboosters beträgt ca. 2-2,5 g, was signifikant niedriger ist als bei den bisherigen Brakeboostern (ca. 20-70 g).

6.2 Fertigung des Strukturbauteils

Die in Abschnitt 4.7 erzeugten Wickelmuster sollen hier nun zu einem prüfbar Bauteil gewickelt werden. Es wurde mit Hilfe der Ausgabe-Matrix (siehe Abschnitt 4.3) ermittelt, dass für den anisotrop topologieoptimierten Brakebooster die Muster A (2x), C (3x), I (1x) und J (2x) benötigt werden (siehe Abbildung 6.1). Dafür muss zuerst ein Ablaufplan der Wickelmuster erstellt werden und anschließend ein Werkzeug (siehe Abb. 6.6) zur Herstellung des Bauteils entworfen werden.

6.2.1 Ablaufplan der Wickelmuster

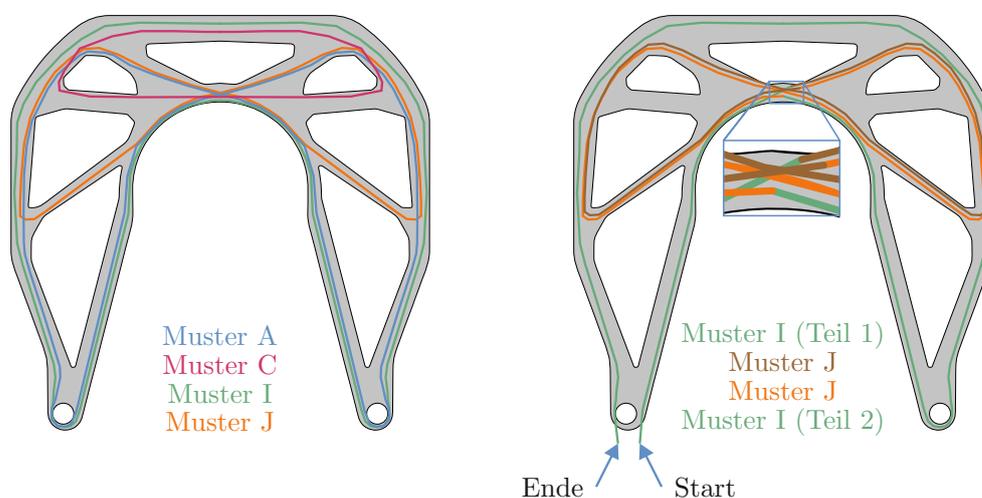


Abb. 6.1: Topologieoptimierter Brakebooster mit zu wickelnden Wickelmustern A, C, I und J (links) sowie der Ablauf zum Aufbringen der ersten drei Wickelmuster I, J und J mit Detail der Übergänge (rechts).

Da im Wickelverfahren, im Gegensatz zum TFP-Verfahren, der Material-Strang nicht komplett durchtrennt wird und zusätzlich eine Durchmischung der Wickelmuster erreicht werden soll, muss ein Ablaufplan für die einzelnen Wickelmuster erstellt werden. Der Beginn und das Ende des Wickelns soll an einem der beiden Lasteinleitungspunkte erfolgen. Dies ermöglicht eine einfache Anbringung der Enden des TowPreg-Stranges.

Da jedoch nicht alle Muster über den Lasteinleitungspunkt laufen, werden die Muster nicht immer vollständig gewickelt. Damit aber nicht zu viel Material abgelegt wird, werden die einzelnen Muster nicht immer am Stück gewickelt. Es kommt beispielsweise vor, dass das Muster I zu Beginn nur zu einem Teil auf Kante 1 abgelegt wird und am Ende der Kante 8, direkt mit dem Wickeln von Muster J begonnen wird. Später wird dann das Muster I beendet. Dieses Vorgehen garantiert, dass der Start- und Endpunkt an der gleichen Stelle liegt, der TowPreg-Strang nicht durchtrennt wird und exakt so viel Material wie geplant abgelegt wird. In Abbildung 6.1 ist dieses Vorgehen noch einmal für die ersten drei Muster dargestellt. Für den anisotrop topologieoptimierten Brakebooster ergibt sich somit der dargestellte Ablaufplan für die acht benötigten Wickelmuster:

I → J → J → I → A → C → C → A → A → C → A
 Teil 1 Teil 2 Teil 1 Teil 2 Teil 1 Teil 2

6.2.2 Roboter-Programmierung des Brakeboosters

Die Programmierung der Wickelmuster des Brakeboosters erfolgt in der KUKA Robot Language (KRL). In Abbildung 6.2 wird der schematische Aufbau des Codes gezeigt. Im Header (aus Gründen der Übersichtlichkeit nur teilweise dargestellt) werden unter anderem der Dateispeicherort, die Ausgangsposition des Roboters, das verwendete Werkzeug- (TOOL) und das Werkstück-Koordinatensystem (BASE) sowie die Überschleifdistanz (C_DIS) angegeben.

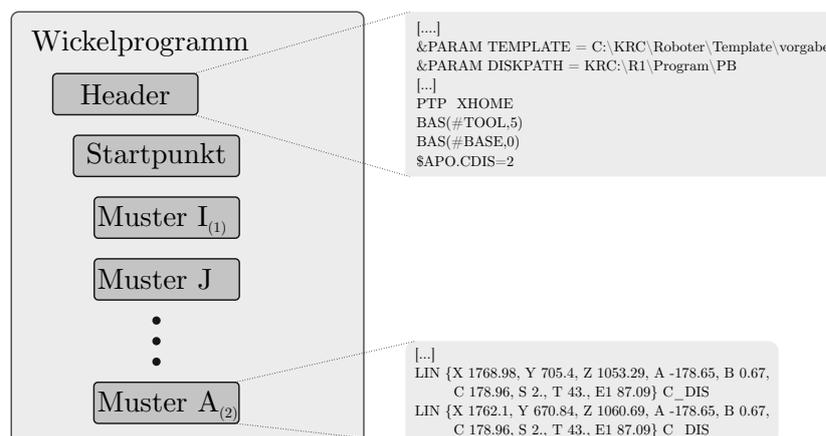


Abb. 6.2: Aufbau des Wickelprogramms für den anisotrop optimierten Brakebooster mit Ausschnitten des KUKA-Codes.

Die Überschleifdistanz verhindert ein direktes Anfahren eines Punktes [149]. Der Wert wird in Millimeter angegeben und beschreibt den Radius eines Kreises um den zu überschleifenden Punkt (siehe Abb. 6.3). Sobald der Roboter bei der Bewegung von einem Punkt, z.B. P1, zum überschleifenden Punkt P2, besagten Kreis schneidet, beginnt

der Roboter schon vor Erreichen des Punktes P₂, den übernächsten Punkt P₃ anzufahren. Dies führt zu einer flüssigeren und schnelleren Bewegung, da der Roboter den Punkt P₂ nicht exakt anfahren muss, was ein starkes Abbremsen und wieder Beschleunigen bedeutet. Die Überschleifdistanz ist bewusst sehr klein gewählt ($C_DIS = 2\text{ mm}$), um eine Kollision des Fadenauges am Wickelkopf mit den Pins des Werkzeugs zu vermeiden. Dies verlängert zwar die Fertigungszeit, im Vergleich zu einer hohen Überschleifdistanz, ist aber aufgrund der geringen absoluten Abmessung des Brakeboosters unabdingbar und noch immer schneller, als ohne Überschleifen.

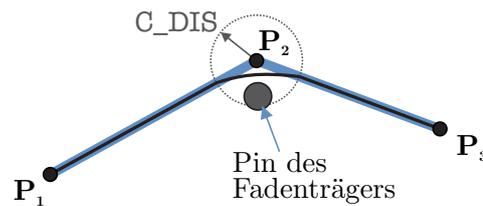


Abb. 6.3: Beispielhafte Darstellung der Überschleif-Funktion anhand eines Pins in einem Fadenträger, aktiviert bei Punkt P₂, bei einer linearen Bewegung zwischen drei Punkten mit eingezeichnetem Radius für C_DIS ; die schwarze Kurvenbewegung ergibt sich bei Aktivierung der Funktion, der blaue Pfad ohne;

Nach dem Header wird ein Startpunkt in der Nähe des Werkzeuges festgelegt, bei dem der Roboter anhält. Nun kann das TowPreg an der Wickelstange befestigt werden und zum ersten Pin gelegt werden. Jetzt können die einzelnen Muster-Programme in beliebiger Reihenfolge kombiniert werden. Dabei gilt es zu beachten, dass der Endpunkt des einen Musters, nahtlos in den Startpunkt des darauffolgenden Musters übergeht. Ist dies nicht der Fall, müssen sogenannte Übergangsprogramme zwischen den Mustern eingeführt werden. Dies ist hier nicht der Fall, da die Muster in einzelne Teilmuster zerlegt werden (wie oben beschrieben). Somit ist ein nahtloser Übergang gewährleistet.

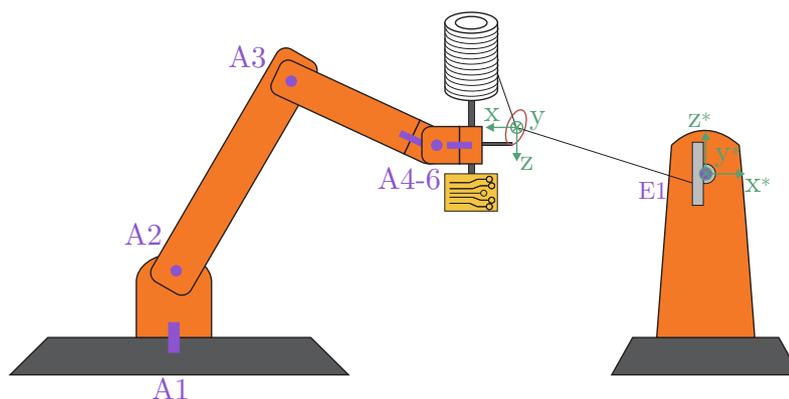


Abb. 6.4: Schematischer Aufbau der Wickelanlage bei der Fertigung des Brakeboosters mit Roboterachsen (Lila) sowie Werkzeug- und Basis-Koordinatensystemen.

Für das letzte Muster (Muster A, Teil 2) sind die letzten beiden Code-Zeilen beispielhaft mit dargestellt. Die Bewegungen des Roboters werden mit Hilfe von LIN-Befehlen ausgeführt, also einer linearen Bewegung entlang der kürzesten Verbindungsgeraden

zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten. In jedem Punkt sind dabei die X-, Y- und Z-Abstände des Fadenauges (TOOL) in Bezug auf das Werkzeug (BASE) angegeben. Zusätzlich wird auch noch das Kippen des Wickelkopfes um die drei Achsen mit den A-, B- und C-Werten angegeben (siehe Abb. 6.4).

Status (S) und Turn (T) in der jeweiligen Code-Zeile beschreiben die Orientierung der Roboter-Achsen untereinander im jeweiligen Punkt. Da ein vorgegebener Punkt mit unterschiedlich orientierten Roboter-Achskonfigurationen angefahren werden kann, müssen diese Werte für eine eindeutige Position des Roboters angegeben werden. Der Drehwinkel E1 der externen Achse wird als Letztes im Bereich der Koordinaten des Punktes angegeben. Am Ende wird mit dem Befehl C_DIS ein Überschleifen der einzelnen Punkte aktiviert.

6.2.3 Wickeln des Brakeboosters

Nachdem nun der Wickelplan angefertigt wurde, kann der Brakebooster gefertigt werden. Da der Brakebooster aus Pfaden mit lokal hohen Umlenkswinkeln besteht, genügt der Tack des TowPregs nicht, um diese Geometrien darzustellen. Es müssen also Anpassungen am Werkzeug, wie in Abschnitt 4.3 vorgestellt, vorgenommen werden. In Abbildung 6.5 ist der Brakebooster während des Wickelns dargestellt. Zu erkennen ist auch der hohe Umlenkswinkel des TowPregs am PTFE-Fadengaue. Aufgrund der hohen Umlenkswinkel wird mit einer relativ niedrig eingestellten Fadenspannung von $F = 30\text{N}$ gewickelt.

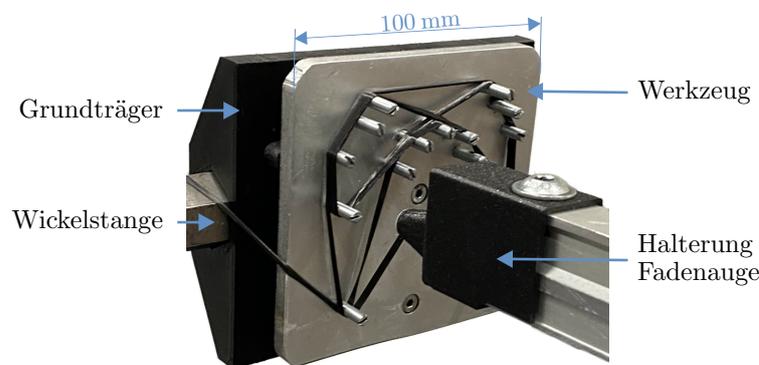


Abb. 6.5: Wickelvorgang des anisotrop topologieoptimierten Brakeboosters zum Ende des Musters I, mit den Werkzeugkomponenten und dem Fadengaue.

Für den Brakebooster erfolgt dies, aufgrund der ebenen Grundstruktur, mit Hilfe von Schaftschrauben (nach ISO 2342 [150]), die als Pins fungieren und mittels Gewinden in das Werkzeug geschraubt werden (siehe Abschnitt 4.3). Dabei kommen lange (M4x20) und kurze (M4x16) Pins zum Einsatz. Die kurzen Pins werden benötigt, da der Wickelkopf mit dem Fadengaue an diesen Stellen mit langen Pins kollidieren würde. Zur Kompaktierung wird ein Stempel mit Aussparungen im Bereich der Pins genutzt. Es wurden auch Hülsen zur Kompaktierung getestet, jeweils eine Hülse pro Pin, wie in Abbildung 4.5c zu sehen, allerdings waren die Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Auf-

grund der Fadenspannung beim Wickeln des Brakeboosters wurde durch die Hülsen nur eine lokale Kompaktierung erreicht. Mit Hilfe des Stempels kann der Brakebooster als Ganzes kompaktiert werden. Dies ist nötig um die maximale Dicke des Brakeboosters von 4 mm einzuhalten.

In Abbildung 6.6 ist der Fertigungsablauf dargestellt. Zu Beginn (Abb. 6.6 a) wird das Werkzeug mit den unterschiedlichen Pins bestückt und mit Trennmittel (*Semiperm Monofilm*) behandelt. Danach wird das Werkzeug auf der externen Achse befestigt und der Brakebooster wird gewickelt. Dafür wird abermals TowPreg der Firma *TCR Composites* genutzt, das aus einem 12k T700 Kohlenstofffaserfilament und dem Epoxidharz-Matrixsystem UF3376 besteht (siehe Tab. 3.1). Danach wird das Werkzeug demontiert und die beiden Enden des TowPreg-Stranges werden hinter dem Werkzeug verbunden (Abb. 6.6 b). Dies soll verhindern, dass sich die Wicklungen vor dem Aushärten lösen.

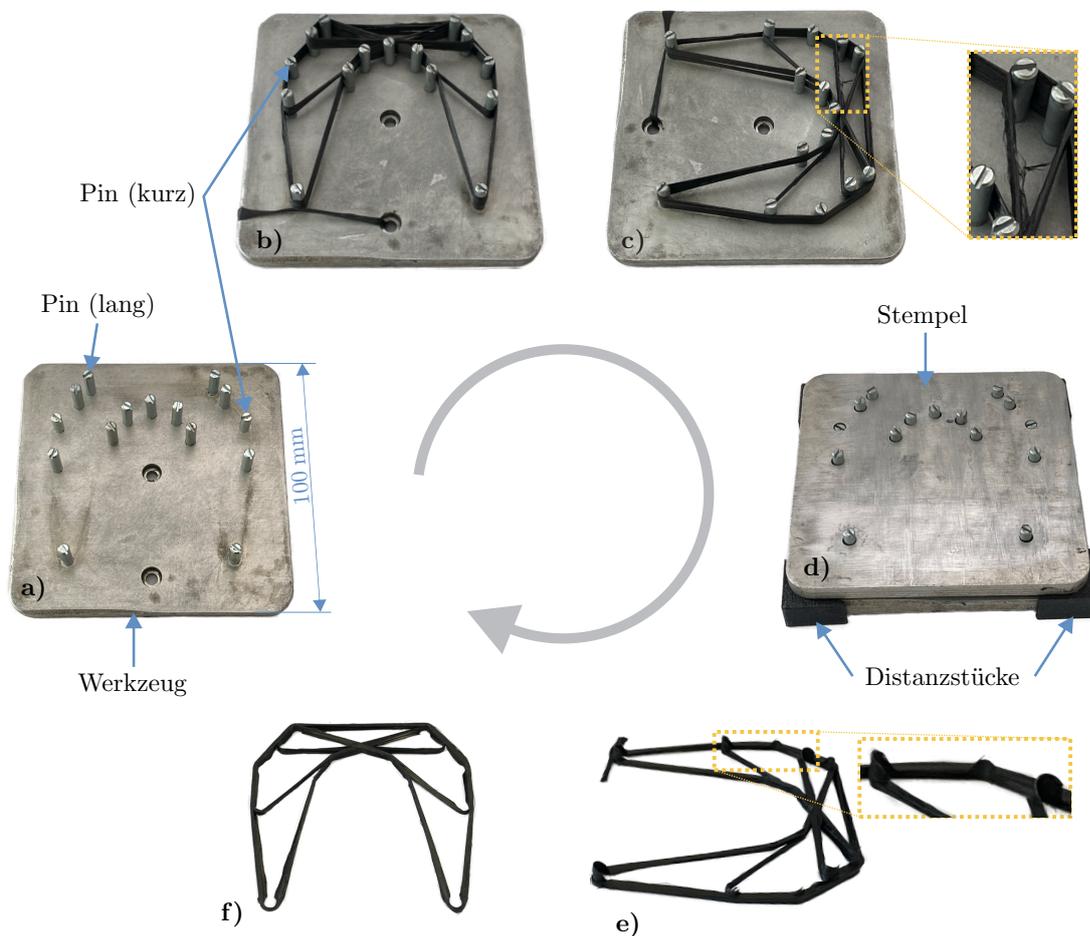


Abb. 6.6: Fertigung des anisotropen Brakeboosters mit Werkzeug (a), gewickeltem Brakebooster (b & c), hervorgehobener Vorschädigung (c), montierten Distanzstücken und Stempel (d), entformtem (e) und nachbearbeitetem Brakebooster (f).

Eine weitere Ansicht des Brakeboosters auf dem Werkzeug (Abb. 6.6 c) lässt erkennen, wie die Wickelmuster übereinander aufgebaut werden. Ein dazugehöriges Detail zeigt, dass das TowPreg-Material aufgrund der hohen Umlenkwinkel bei dieser Struktur am

Fadenaugel leicht beschädigt wurde. Dies geschieht durch ein Ausfransen des Stranges, bei dem einzelne Fasern des Filaments durchtrennt werden. Da dies nur einige wenige Fasern betrifft, stellt es kein Problem dar. In der nächsten Darstellung (Abb. 6.6 d), ist das Werkzeug mit montiertem Stempel zu sehen. Gut zu erkennen sind hier die beiden kurzen Pins. Der Stempel wird mit Hilfe von Schraubzwingen soweit in Richtung Werkzeug gedrückt, bis dieser in Kontakt mit den vier Distanzstücken an jeder Ecke steht. Dies stellt sicher, dass die maximale Dicke des Brakeboosters, nach dem Aushärten im Vakuumsack, kleiner als 4 mm ist. Nachdem der Brakebooster vorkompaktiert wurde, werden die Schraubzwingen und die Distanzstücke entfernt und das Bauteil wird mit Werkzeug und Stempel im Vakuumsack bei ca. -0,9 bar im Ofen ausgehärtet. Der empfohlene Härtezyklus, laut Datenblatt des Herstellers, sieht dabei eine Aufheizrampe mit 2,8 °C/min bis zum Erreichen der Solltemperatur vor. Anschließend wird die Solltemperatur, hier 121 °C, für 4 h gehalten. Nach Ende des Zyklus wird das Bauteil unter Vakuum, bei Raumtemperatur, für 15 Minuten abgekühlt.

Wie eingangs erwähnt, ergeben sich durch den Fertigungsprozess im Wickelverfahren Einschränkungen in gewissen Bauteileigenschaften, was ein Grund für die spätere Hybridisierung im Spritzgussverfahren darstellt. So sind in diesem Beispiel etwa, die eben erwähnten ausgefranseten Bereiche im gewickelten, aber noch nicht ausgehärteten Bauteil, deutlich erkennbar (Detail Abb. 6.6 c). Auch im Bereich der Bohrungen des Stempels kommt es zu ungewollten Materialanhäufungen (Detail Abb. 6.6 e). Wegen der benötigten Toleranzen weisen die Bohrungen einen größeren Durchmesser als die Pins auf. Wird der Stempel nun entlang der Pins nach unten gedrückt, bleibt TowPreg-Material am Pin haften und wird nicht kompaktiert. Diese Bereiche müssen händisch entfernt werden, um die maximale Dicke von 4 mm einzuhalten. Kommt ein solcher Stempel, oder alternativ die Hülsen, in einem späteren Serienprozess zum Einsatz, kann das Problem durch engere Tolerierungen gelöst werden.

6.3 Prüfung des Strukturbauteils

6.3.1 Vorversuch

Der Brakebooster wird, wie bereits erwähnt, in einem Zugversuch getestet. Die Versuche werden an einer Universalprüfmaschine der Firma *Test* vom Typ *112.20* durchgeführt. Die Geschwindigkeit der Prüfmaschine beträgt 5 mm/min. Vor dem Beginn der Messung wird eine Vorkraft von 2 N angefahren und der Maschinenweg auf Null gesetzt. Die Ermittlung der Steifigkeit erfolgt anhand des Maschinenwegs im Anfangsbereich der aufgezeichneten Kraft-Weg-Kurve, im Bereich von 3-8 N. Es werden fünf Brakebooster getestet. In Abbildung 6.7 ist der Aufbau, mit dem anisotrop topologieoptimierten und gewickeltem Brakebooster, am Ende der Prüfung gezeigt.

Die geringe ermittelte spez. Steifigkeit kommt daher, dass es frühzeitig zu einer Delamination zwischen zwei Wickelmustern kommt (Abb. 6.7). Das Problem liegt darin begründet, dass das Ergebnis der Topologieoptimierung von einer idealen Verbindung

der einzelnen Kanten untereinander ausgeht, bzw. keine Unterteilung in einzelne Wickelmuster vorsieht. Diese Information zum Kraftfluss wurde bei der Erzeugung des Wickelplans allerdings nicht berücksichtigt. Hier wird bisher lediglich versucht, die Materialverteilung des Topologieoptimierers möglichst exakt im Wickelverfahren nachzubilden, ohne Berücksichtigung des Kraftflusses.

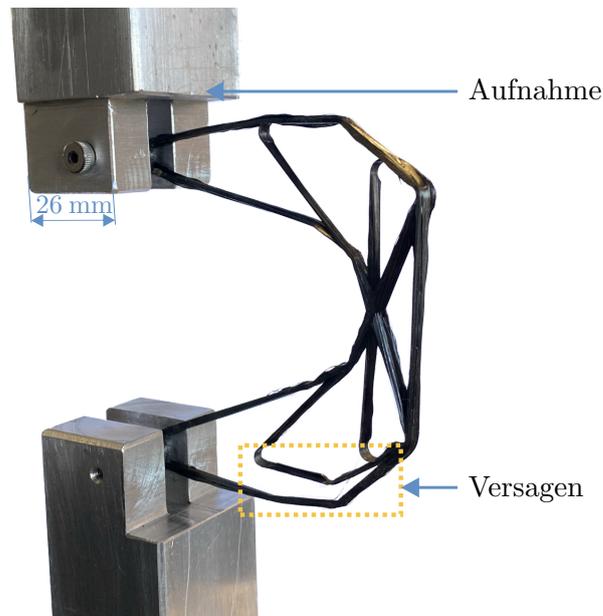


Abb. 6.7: Aufbau des Zugversuchs für den gewickelten Brakebooster mit gefrästen Aufnahmen und Versagen des Brakeboosters der ersten Generation (b1).

In *Spickenheuer* [113] wird ein Überblick über die massespezifischen Steifigkeitswerte unterschiedlicher Brakebooster geliefert, welche in Tabelle 6.1 zusammengefasst sind. Die beiden ersten Varianten *Tektro* und *DKG* sind dabei käuflich erwerbbar Brakebooster aus nicht genauer spezifizierten Aluminium-Legierungen. Die Gelege-Variante weist einen quasiisotropen Lagenaufbau aus HT-Fasern auf $(0/45/90/-45)_s$. Als TFP-Variante wird die neue, von *Spickenheuer* [113] entworfene, topologieoptimierte Variante, mit einem Kohlenstofffasergewebe, als Basismaterial und *HT* C-Fasern, als abgelegte Endlosfasern, gezeigt.

Tab. 6.1: Übersicht unterschiedlicher Varianten des Brakeboosters mit Werten aus *Spickenheuer* [113] und dem gewickeltem Brakebooster.

	Tektro	DKG	Gelege	TFP	Wickeln b1
Material	Alu.-Leg.	Alu.-Leg.	CFK (HT)	CFK (HT)	CFK (HT)
Masse [g]	52	71,1	36,6	20,6	$2,2 \pm 0,02$
spez. Steifigkeit [N/mm/g]	2,3	3,3	5,1	11,5	$2,7 \pm 0,6$

Ein direkter Vergleich der spez. Steifigkeit der gewickelten Variante zu den anderen, in der Tabelle angegebenen Varianten, ist leider nicht möglich, da sich die geometrischen Abmessungen unterscheiden. Daher dient die Tabelle 6.1 lediglich als Übersicht.

6.3.2 Erweiterung des Wickel-Matrix-Codes

Zu Beginn wird noch eine Übersicht (Tab. 6.2) über die neuen, in diesem Abschnitt verwendeten Nomenklaturen gegeben, welche zusätzlich zu den Bezeichnungen aus Tabelle 4.3 genutzt werden.

Tab. 6.2: Bezeichnung, Aufbau und Beschreibung der neuen verwendeten Matrizen und Variablen für die Berechnung des überarbeiteten Wickelplans.

Name	Bezeichnung	Aufbau	Beschreibung
Ausgabe	$\hat{\mathbf{A}}_n$	[1x10]	Anzahl der neu zu wickelnden Basis-Wickelmuster zum Erzeugen der dazugehörigen Lösungs-Matrix
Indikator	V	[1x1]	Indikator zur Bewertung der berechneten Lösungen mit den Teilindikatoren v_1, v_2, v_3 & v_4
Ausgabe	$\hat{\mathbf{A}}_n^*$	[1x10]	mit Hilfe der Residuums-Bedingungen und dem Indikator V reduzierte Ausgabe der Ausgabe-Matrizen
Ist	$\hat{\mathbf{T}}$	[1x8]	neue finale Lösungsmatrix
Residuum	$\hat{\mathbf{R}}$	[1x8]	Differenz Lagenanzahl auf jeder Kante zwischen neuer Lösungs- & bekannter Ist-Matrix
Gesamt-residuum	\hat{R}	[1x1]	Summe aller Einzelabweichungen der Residuums-Matrix ($\hat{\mathbf{R}}$)

Um den Kraftfluss bei der Generierung der Wickelmuster zu berücksichtigen, muss der *MATLAB*-Code zur Generierung der Lösungs-Matrizen angepasst werden. Damit der Kraftfluss in allen Kanten des Brakeboosters berücksichtigt wird, soll nun jedes wickelbare Basis-Wickelmuster mindestens einmal im Wickelplan vorkommen. Dies soll sicherstellen, dass eine Lastübergabe in allen Bereichen der Kanten möglich ist. Zusätzlich sollen die händisch bestimmten Residuums-Grenzen wegfallen, um den Grad der Automatisierung zu erhöhen. Da die Lösungs-Matrizen nun nicht mehr allein anhand der geringsten Abweichung von der Topologieoptimierung bewertet werden sollen, wird ein Bewertungsindikator V eingeführt. Der Bewertungsindikator V soll so niedrig wie möglich sein und berücksichtigt dabei die folgenden Punkte:

1. Verhältnis der Anzahl an genutzter Basis-Wickelmuster zur Anzahl der vorhandenen Lasteinleitungs-Basis-Wickelmuster $\rightarrow v_1$

2. Höhe des Gesamtresiduums $\hat{R} \rightarrow v_2$
3. Differenz zwischen dem maximalen ($\max(\hat{\mathbf{R}})$) und minimalen ($\min(\hat{\mathbf{R}})$) Residuum in einer Kante $\rightarrow v_3$
4. Abweichung der Lagenanzahl nach unten, also zu wenig Lagen auf einer bestimmten Kante, soll klein gehalten werden $\rightarrow v_4$

Der erste Punkt sorgt dafür, dass Ausgabe-Matrizen mit einer höheren relativen Gesamtanzahl von Lasteinleitungs-Basis-Wickelmustern, in Bezug auf alle verwendeten Wickelmuster, bevorzugt werden. Diese Muster sind, als Erkenntnis der Vorversuche, kraftflussgerechter und sollen somit für eine höhere spezifische Steifigkeit sorgen. Da ein niedriger Zahlenwert für den Indikator V als „bessere“ Lösung angestrebt wird, wird die Summe aller vorhandenen Wickelmuster der Lösungs-Matrix durch die Summe aller vorhandenen Lasteinleitungs-Basis-Wickelmuster geteilt.

Im zweiten Punkt wird das Gesamtresiduum \hat{R} , welches nicht vollständig vernachlässigt werden soll, mit einbezogen. Damit alle vier Teilindikatoren ähnlich stark berücksichtigt werden, wird die Wurzel des Betrags des Gesamtresiduums betrachtet. Da das Gesamtresiduum \hat{R} auch den Wert 0 annehmen kann, muss hier eine Fallunterscheidung durchgeführt werden (Gleichung (6.4)). Für den Fall von $\hat{R} = 0$ wird $v_2 = 0,5$ festgelegt, um somit noch einen niedrigeren Wert als bei $\hat{R} = 1$ zu erzeugen.

Der dritte Punkt bezieht die Gleichmäßigkeit der vorhandenen Einzelresiduen $\hat{\mathbf{R}}$ mit ein. Es sollen hier Ausgabe-Matrizen bevorzugt werden, bei denen keine lokal stark erhöhten Einzelresiduen vorhanden sind. Wäre dies nicht der Fall, würde die Masse durch die lokale Versteifung ansteigen, nicht jedoch die spezifische Gesamtsteifigkeit. Auch hier muss eine Fallunterscheidung durchgeführt werden (Gleichung (6.5)). Wie schon beim Teilindikator v_2 wird hier, für den Fall das keine Differenz zwischen den Einzelresiduen berechnet wird, $v_3 = 0,5$ festgelegt.

Der letzte Punkt der Teilindikatoren bezieht sich auf ein negatives Einzelresiduum. Dies ist für den anisotrop topologieoptimierten Brakebooster nicht von Relevanz, da dies hier zu Beginn ausgeschlossen wurde. Für den später gezeigten, hybrid topologieoptimierten Brakebooster, ist dies allerdings von Bedeutung, da hier negative Einzelresiduen zugelassen werden. Je geringer dieser Wert ist, desto besser die Bewertung. Auch muss, wie in den beiden oberen Fällen, eine Fallunterscheidung durchgeführt werden, welche dem gleichen Schema folgt (Gleichung 6.6).

Da anhand der oben genannten Punkte eine sehr hohe Anzahl an Lösungen generiert werden kann, die zuvor getroffene händische Begrenzung über die Residuen fällt weg, muss eine andere Eingrenzung der Ausgabe-Matrizen getroffen werden. Hierfür wird das Gesamtresiduum \hat{R} genutzt, welches maximal die doppelte Anzahl der Soll-Lagen der Soll-Matrix \mathbf{S} aufweisen darf. Zusätzlich werden vom Code nur die fünf Ausgabe-Matrizen mit den niedrigsten Bewertungsindikatoren V ausgegeben und nach aufsteigender Reihenfolge sortiert. Unter der Berücksichtigung der oben genannten Punkte, berechnet sich der Bewertungsindikator V wie folgt:

$$V = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot v_4, \quad (6.2)$$

mit den folgenden Teilindikatoren:

$$v_1 = \frac{\sum_{n=1}^{10} a_n}{a_1 + a_2 + a_8 + a_9}, \quad (6.3)$$

$$v_2 = \begin{cases} 0,5 & \text{für } \hat{R} = 0 \\ \sqrt{|\hat{R}|} & \text{für } \hat{R} \neq 0, \end{cases} \quad (6.4)$$

$$v_3 = \begin{cases} 0,5 & \text{für } (\max(\hat{\mathbf{R}}) - \min(\hat{\mathbf{R}})) = 0 \\ \max(\hat{\mathbf{R}}) - \min(\hat{\mathbf{R}}) & \text{für } (\max(\hat{\mathbf{R}}) - \min(\hat{\mathbf{R}})) \neq 0, \end{cases} \quad (6.5)$$

$$v_4 = \begin{cases} 0,5 & \text{für } \min(\hat{\mathbf{R}}) = 0 \\ \min(\hat{\mathbf{R}})^2 & \text{für } \min(\hat{\mathbf{R}}) \neq 0. \end{cases} \quad (6.6)$$

Mit diesem Indikator werden die folgenden fünf neuen Ausgabe-Matrizen $\hat{\mathbf{A}}_n^*$ und den dazugehörigen Bewertungsindikatoren V berechnet:

$$\hat{\mathbf{A}}_1^* = [3 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1] \quad \text{mit } V = 28,7, \quad (6.7)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_2^* = [3 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1] \quad \text{mit } V = 29,5, \quad (6.8)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_3^* = [3 \ 1 \ 3 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1] \quad \text{mit } V = 33,6, \quad (6.9)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_4^* = [3 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 1] \quad \text{mit } V = 33,6, \quad (6.10)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_5^* = [3 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1] \quad \text{mit } V = 34,3. \quad (6.11)$$

Da die Ausgabe-Matrix $\hat{\mathbf{A}}_1^*$ den niedrigsten Bewertungsindikator V besitzt, wird diese für die Berechnung der finalen Lösungs-Matrix genutzt. Der Indikator V liegt zwar sehr nahe am Wert von $\hat{\mathbf{A}}_2^*$, allerdings ist das Gesamtresiduum \hat{R} bei $\hat{\mathbf{A}}_1^*$ um zwei Lagen niedriger (20 statt 22 Lagen). Die finale Lösungs-Matrix, die Ist-Matrix $\hat{\mathbf{T}}$, lautet wie folgt:

$$\hat{\mathbf{T}} = \hat{\mathbf{A}}_1^* \cdot \mathbf{Z}^* = [3 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [6 \ 4 \ 8 \ 4 \ 8 \ 4 \ 4 \ 10]. \quad (6.12)$$

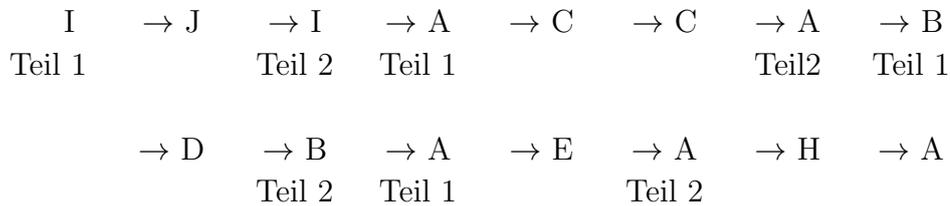
Unter der Berücksichtigung der in Abschnitt 4.7.1 berechneten Soll-Matrix \mathbf{S} , ergeben sich für den Hauptversuch die in Tabelle 6.3 berechneten Einzelresiduen mit Hilfe der neuen Ist-Matrix $\hat{\mathbf{T}}$. Das Gesamtresiduum beträgt dabei $\hat{R} = 20$.

Tab. 6.3: Übersicht über die finale Anzahl der Lagen/Überfahrungen in jeder Kante des Brakeboosters (b2) im Hauptversuch mit Soll-Anzahl, berechneter Ist-Anzahl und dem Residuum in jeder Kante.

Kante	1	2	3	4	5	6	7	8
Ist \hat{T}	6	4	8	4	8	4	4	10
Soll S	3	2	4	3	5	4	4	3
Residuum \hat{R}	3	2	4	1	3	0	0	7

6.3.3 Hauptversuch

Für den Hauptversuch werden die Muster aus der Ausgabe-Matrix \hat{A}_1^* in der nachfolgenden Reihenfolge aufgewickelt. Dabei ist, wie schon beim Brakebooster im Vorversuch, darauf zu achten, dass die Muster gut durchmischt werden. Dies führt wieder dazu, da nicht alle Muster über den Lasteinleitungspunkt gehen, dass einige Muster unterbrochen werden, um einen Übergang zum nächsten Muster zu ermöglichen. Die unterbrochenen Muster werden im Anschluss wieder zu Ende gewickelt.



Mit Hilfe dieses Wickelplans kann der in Abbildung 6.8 dargestellte Brakebooster, im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren, gefertigt werden.

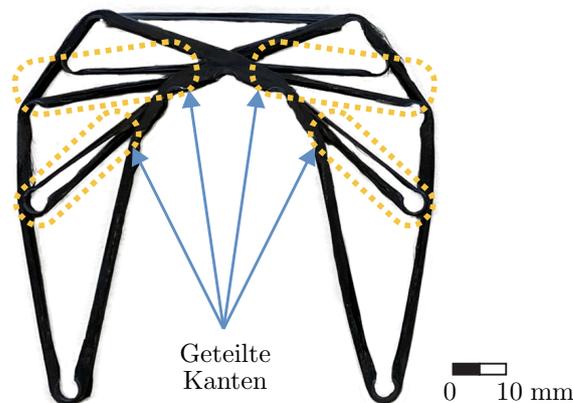


Abb. 6.8: Gewickelter, angepasster Brakebooster b2 mit geteilten Kanten (gelb).

Es ist dabei zu beachten, dass aufgrund der zusätzlichen Wickelmuster, teilweise eine Kante des Brakeboosters von beiden Seiten eines Pins abgefahren werden muss (Kante 2) oder die Kante über unterschiedliche Pins dargestellt werden muss (Kante 4). Dies führt zu den dargestellten, geteilten Kanten im Brakebooster (Abb. 6.8).

Aufgrund des höheren Gesamtresiduums, und somit höherer Lagenanzahl im Brakebooster, erhöht sich die Masse des Brakeboosters im Hauptversuch von ca. 2,2 auf 3,5 Gramm. Der so erzeugte Brakebooster hat eine massespezifische Steifigkeit von $c = 5,7 \pm 0,5 \text{ N/mm/g}$. Damit liegt die Steifigkeit um den Faktor 2,1 höher, als bei den gewickelten Brakeboostern (b1) aus dem Vorversuch. In Tabelle 6.4 ist ein Vergleich der beiden gewickelten Brakebooster angegeben.

Tab. 6.4: Vergleich der beiden unterschiedlichen gewickelten Brakeboostern b1 & b2.

	Wickeln b1	Wickeln b2
Material	CFK (HT)	CFK (HT)
Masse [g]	$2,2 \pm 0,02$	$3,5 \pm 0,03$
spez. Steifigkeit [N/mm/g]	$2,7 \pm 0,6$	$5,7 \pm 0,5$

Im Gegensatz zur ersten Variante des Brakeboosters (b1), kann bei der Variante im Hauptversuch (b2) ein Faserbruch durch Ausknicken der Kante unter Druck, erzielt werden (Abb. 6.9).

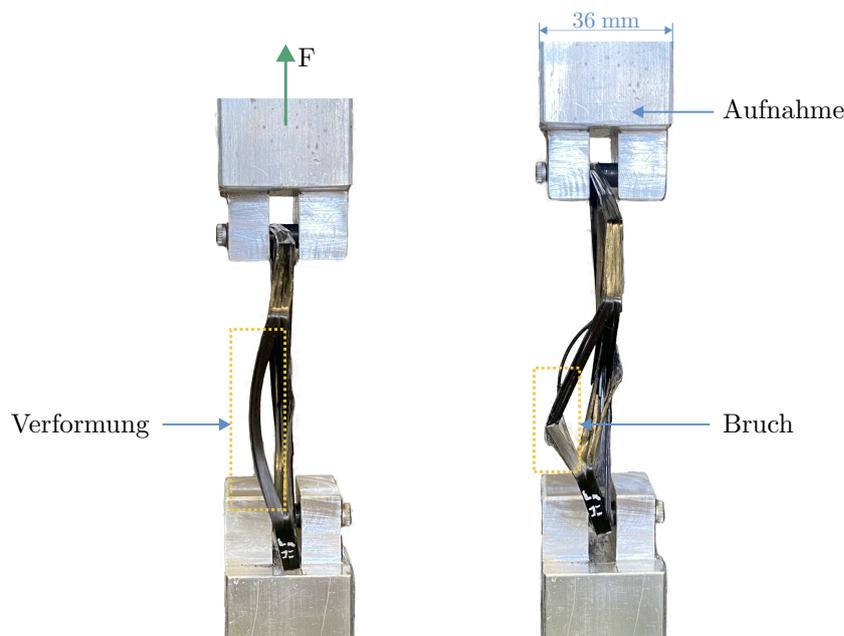


Abb. 6.9: Stirnseitige Ansicht auf den Brakebooster v2, während des Zugversuchs; links: starke Verformung der Kante 7; rechts: Faserbruch in Kante 7.

Dies zeigt, dass durch den neuen Wickelplan, der nun alle wickelbaren Basis-Wickelmuster beinhaltet, ein besserer Kraftfluss erzeugt wird. Die einzelnen Wickelmuster sind untereinander verbunden und verteilen die Lasten wie gewünscht. Es kommt somit zu einem Versagen des Bauteils im Bereich der tragenden Struktur und nicht zu einer Delamination der einzelnen Wickelmuster, wie im ersten Versuch (b1).

6.4 Zwischenfazit

Anhand eines Demonstrators (Brakebooster) konnten sowohl das Potenzial, als auch die Grenzen des roboterbasierten 3D-Faserwickelns gezeigt werden. Es ist möglich, topologieoptimierte Bauteile mit Hilfe eines Roboters, automatisiert im 3D-Faserwickeln zu fertigen. Allerdings sollte bei diesem Verfahren die in Abschnitt 4.4.2 vorgestellte Trenn- und Anlegeeinheit genutzt werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass es keine über- oder unterdimensionierten Bereiche in den gewickelten Bauteilen gibt. Dies setzt allerdings ein Wickeln mit gleichzeitig zwei TowPreg-Strängen voraus. Aufgrund des hier genutzten, verkleinerten Brakeboosters (wegen des Plattenwerkzeugs der Spritzgussanlage), war dies allerdings nicht möglich. Des Weiteren kann es, insbesondere bei kleinen, verwinkelten Strukturen, zu hohen Umlenkswinkeln des TowPreg-Materials kommen. Dies führt dazu, dass das TowPreg aufgrund der Reibungskräfte beim Abziehen im Wickelvorgang leicht beschädigt wird.

Kapitel 7

Hybrides duroplastisch-thermoplastisches Strukturbauteil

Im folgenden Kapitel wird, anhand der Ergebnisse der Hybridisierung in Kapitel 5 sowie der Fertigung des anisotrop topologieoptimierten Demonstrators ohne Umspritzung in Kapitel 6, ein hybrider Demonstrator entworfen, gefertigt und getestet. Dafür werden die Ergebnisse einer hybriden Topologieoptimierung genutzt, um den Demonstrator im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren zu fertigen, mit luftbasiertem Niederdruckplasma vorzubehandeln und anschließend mit kurzglasfaserverstärktem Polyamid zu umspritzen. Am Ende wird der Demonstrator hinsichtlich seiner spezifischen Steifigkeit geprüft und mit vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur sowie mit einem Brakebooster ausschließlich aus PA6GF30 verglichen.

7.1 Ausgangspunkt

Die Basis für die Erstellung der hybriden DP-TP Struktur ist eine hybride Topologieoptimierung. Diese Optimierung berücksichtigt die anisotrope Steifigkeit der Endloskohlenstofffasern und die Steifigkeit des Spritzgussmaterials, wie in Abbildung 7.1 anhand eines topologieoptimierten Balkens von Mehl et al. gezeigt [23].

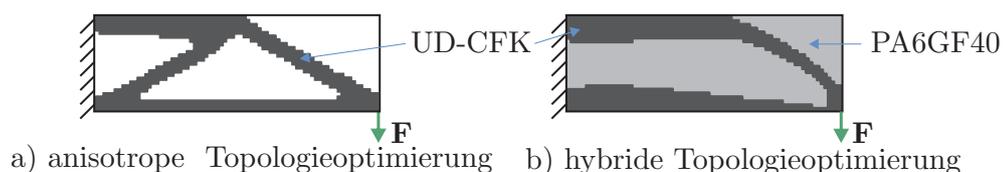


Abb. 7.1: Ergebnisse der Optimierung eines einseitig eingespannten Biegebalkens mit anisotroper Topologieoptimierung in a) und hybrider Topologieoptimierung in b) mit UD-CFK und PA6GF40 als hybrides Basismaterial nach [23].

Im Gegensatz zu anisotrop topologieoptimierten Strukturen kann bei hybrid topologieoptimierten Strukturen allgemein festgestellt werden, dass die endlosfaserverstärkte Skelett-Struktur geometrisch einfachere Konturen annimmt. Dies liegt daran, dass das Spritzgussmaterial Lasten übertragen kann und somit einzelne Bereiche der Endlosfaserverstärkung ersetzen kann (nicht gleichwertig ersetzen, da andere Bereiche der Endlosfaserverstärkung stärker dimensioniert werden). Diese hybride Topologieoptimierung wird auch auf das hier verwendete Beispiel, dem Brakebooster, angewendet, um eine hybride Variante im neuen, hybriden DP-TP Verfahren zu fertigen. Die Topologieoptimierung selbst ist nicht Teil dieser Arbeit, wurde von *Mehl* [107] durchgeführt und dient als Ausgangspunkt für die nächsten Schritte.

In Abbildung 7.2 sind die Ergebnisse der entsprechenden, hybriden Topologieoptimierung dargestellt. Ziel ist es, im ersten Schritt eine höhere spezifische Steifigkeit des Brakeboosters, bei einem gleichbleibendem CFK-Anteil von 50 % des Bauteilvolumens, zu erzielen (vgl. Abb. 7.2 a & b). Es ist zu erkennen, dass bei der hybriden Variante ein breites Schubfeld im oberen Bereich des Brakeboosters ausgebildet wird, welches die beiden umlaufenden Hauptlastpfade miteinander verbindet. Dieser Bereich ist, in Hinblick auf das hier verwendete roboterbasierte 3D-Wickelverfahren, suboptimal, da es lokal zu einer sehr starken Anhäufung von CFK-Material kommt. Dies führt dazu, dass bei Erreichen der gewünschten Lagenanzahl in diesem Bereich des Bauteils, andere Bereiche stark überdimensioniert werden müssen.

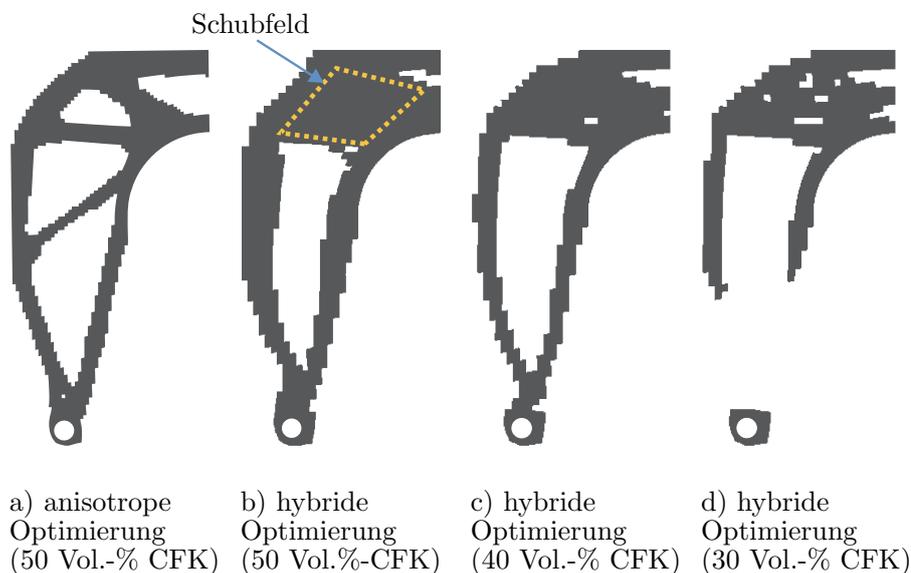


Abb. 7.2: Ergebnisse der Optimierung des Brakeboosters mit anisotroper Topologieoptimierung in a) und hybrider Topologieoptimierung in b)-d) für unterschiedliche Zielvolumen des CFK-Anteils nach [107].

Um dies zu umgehen und ein fertigungsgerechtes Ergebnis zu erzielen, wird der Anteil des CFK-Materials am Brakebooster schrittweise gesenkt (Vgl. Abb. 7.2 c-d). Dies führt allerdings dazu, dass im relevanten Bereich weiterhin eine starke Anhäufung von CFK-Material vorhanden ist, dafür aber andere CFK-Bereiche unterbrochen werden.

Somit kann der Brakebooster nicht kontinuierlich gewickelt werden und ein anderes Fertigungsverfahren, z.B. das automatisierte Tapelege-Verfahren, müsste eingesetzt werden.

Damit eine Fertigung des in Abbildung 7.2 b dargestellten Brakeboosters im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren möglich ist, wird das obere breite Schubfeld, mit Hilfe der bisher verwendeten Kanten im Graph, aufgeteilt. Somit liegt hier nicht eine Kante vor, sondern die beiden Kanten 4 und 6 (siehe Abb. 7.3) decken diesen Bereich ab. Dies ist eine der zu Beginn erwähnten Problematiken im roboterbasierten 3D-Wickelverfahren, bei dem flächige Bereiche nicht gut abgedeckt werden können. Um das flächige Schubfeld vollständig abdecken zu können, müssten mehrere zusätzliche Pins im Bereich der Kanten 5 & 8 eingefügt werden. Aufgrund der engen Abstände der Pins untereinander, könnten diese aber nicht mehr unwickelt werden.

Diese Aufteilung des Schubfeldes führt dazu, dass durch die Nutzung unterschiedlicher Wickelmuster, der hybrid topologieoptimierte Brakebooster gefertigt werden kann. Dabei können aus den bisher bekannten, acht wickelbaren Mustern, die folgenden vier Basis-Wickelmuster genutzt werden (Muster A, C, H und I). Die anderen, nicht genutzten und wickelbaren Basis-Wickelmuster, legen Material entlang der Kante 2 ab, welche hier allerdings nicht benötigt wird. Mit dieser Aufteilung wird im folgenden Abschnitt der hybrid topologieoptimierte Brakebooster gefertigt.

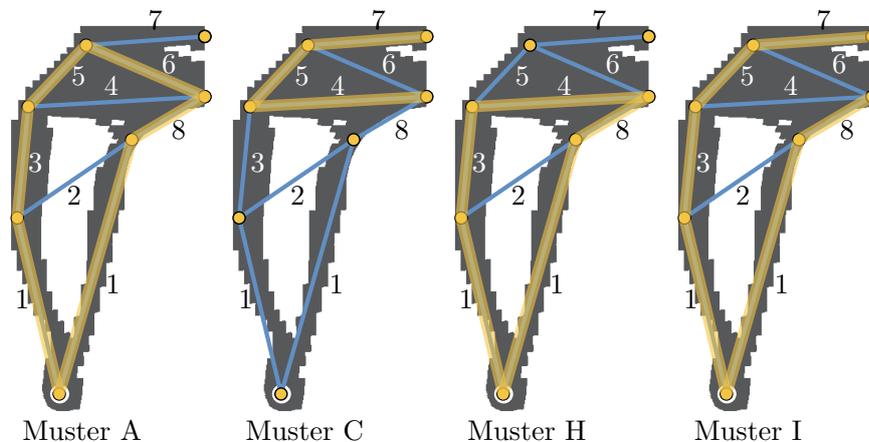


Abb. 7.3: Aufteilung des hybrid topologieoptimierten Brakeboosters anhand des vorhandenen Graphen mit den vier dazugehörigen, wickelbaren Basis-Wickelmustern.

7.2 Roboterbasierte Fertigung der Struktur

7.2.1 Berechnung der benötigten Basis-Wickelmuster

Die Erstellung des Wickelplans erfolgt analog zu den beiden vorherigen, nicht hybriden Brakeboostern. Für die Berechnung der Soll-Matrix wird der gleiche Graph genutzt. Die Bestimmung der benötigten Lagenanzahl in jeder Kante, erfolgt wie in Abschnitt 4.7,

mittels der Übertragung der Breite der einzelnen Kanten des topologieoptimierten Modells. Die Bezeichnung der Matrizen und Indikatoren ist dabei identisch zu den vorherigen Brakeboostern, diesmal gekennzeichnet durch ein „ $\tilde{}$ “ über den Buchstaben. Somit ergibt sich folgende Soll-Matrix $\tilde{\mathbf{S}}$ für den hybrid topologieoptimierten Brakebooster, wobei Kante 2 nicht bewickelt wird und Kante 4 und 6 jeweils zur Hälfte die Lagenanzahl des Schubfeldes des Brakeboosters enthalten (siehe Abb. 7.3).

$$\tilde{\mathbf{S}} = [2 \ 0 \ 5 \ 7 \ 4 \ 7 \ 4 \ 8] \in \mathbb{N}. \quad (7.1)$$

Für die optimierte Nutzung der benötigten Wickelmuster wird der gleiche *MATLAB*-Code mit dem identischen Indikator V aus Abschnitt 6.3.2 genutzt. Lediglich zwei weitere Randbedingungen werden für die hybride Variante des Brakeboosters berücksichtigt.

Maximale Lagenanzahl Da der Brakebooster im identischen Plattenwerkzeug wie die hybriden Probekörper umspritzt wird, darf die CFK-Lagenanzahl nicht zu hoch sein, da das Spritzgusswerkzeug sonst nicht geschlossen werden kann. Die maximale Lagenanzahl in jeder Strecke wird im Code somit auf 8 Lagen begrenzt.

Negative Residuums-Abweichung Aufgrund der begrenzten Anzahl von Basis-Wickelmustern (vier Stück), der Verteilung der Lagenanzahl anhand des Ergebnisses der Topologieoptimierung sowie der Begrenzung der maximalen Lagenanzahl aufgrund des Spritzgusswerkzeuges, müssen negative Abweichungen der Einzelresiduen zugelassen werden, um Ergebnisse zu erzeugen. Dies wurde bei den vorherigen, nicht hybriden, Brakeboostern ausgeschlossen, da es sonst zu einer lokalen Schwächung des Bauteils kommt. Da die spezifische Steifigkeit des Bauteils betrachtet wird, kann diese lokale Schwächung zu einem zu niedrigen Wert führen. Dies ist auch dadurch bedingt, dass es sich bei diesem gewickelten Bauteil um eine fachwerkartige Struktur handelt, was dazu führen kann, dass zu dünne Kanten des Bauteils versagen. Die Gefahr eines Versagens durch Knicken der gewickelten Struktur sowie die lokale Schwächung der Struktur, können aufgrund der stützenden Wirkung des Spritzgussmaterials reduziert werden. Aus diesen genannten Gründen, und vor allem wegen den begrenzten Abmessungen des Spritzgusswerkzeuges, wird bei der Berechnung des Lagenaufbaus, eine negative Einzelabweichung der Lagenanzahl bei den Kanten des hybriden Brakeboosters zugelassen.

Mit diesen vorhandenen Randbedingungen ergeben sich die folgenden, auf fünf reduzierten Ausgabe-Matrizen $\tilde{\mathbf{A}}_n^*$, mit den dazugehörigen Bewertungs-Indikatoren V :

$$\tilde{\mathbf{A}}_1^* = [4 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \quad \text{mit } V = 94,5, \quad (7.2)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_2^* = [3 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0] \quad \text{mit } V = 96,0, \quad (7.3)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_3^* = [4 \ 0 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0] \quad \text{mit } V = 130,9, \quad (7.4)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_4^* = [2 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 4 \ 0] \quad \text{mit } V = 142,9, \quad (7.5)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_5^* = [3 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 3 \ 0] \quad \text{mit } V = 142,9. \quad (7.6)$$

Mit Hilfe der Ausgabe-Matrix $\hat{\mathbf{A}}_1^*$ kann die finale Lösungs-Matrix, die Ist-Matrix $\tilde{\mathbf{T}}$, wie folgt berechnet werden:

$$\tilde{\mathbf{T}} = \tilde{\mathbf{A}}_1^* \cdot \mathbf{Z}^* = [4 \ 0 \ 3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [6 \ 0 \ 6 \ 4 \ 8 \ 4 \ 4 \ 6]. \quad (7.7)$$

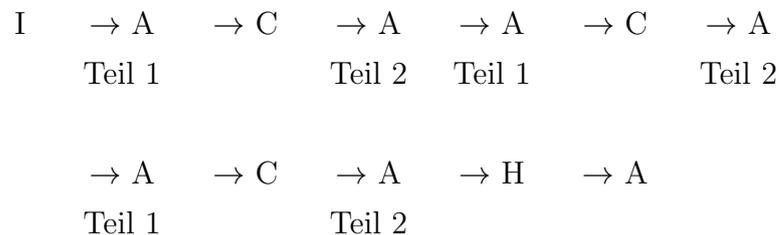
Hiermit ergeben sich für den hybriden Brakebooster die in Tabelle 7.1 berechneten Einzelresiduen. Das Gesamtresiduum beträgt dabei $\hat{R} = 1$.

Tab. 7.1: Übersicht über die finale Anzahl der Lagen/Überfahrungen in jeder Kante des hybriden Brakeboosters mit Soll-Anzahl, berechneter Ist-Anzahl und dem Residuum in jeder Kante.

Kante	1	2	3	4	5	6	7	8
Ist $\tilde{\mathbf{T}}$	6	0	6	4	8	4	4	6
Soll $\tilde{\mathbf{S}}$	2	0	5	7	4	7	4	8
Residuum $\tilde{\mathbf{R}}$	4	0	1	-3	4	-3	0	2

7.2.2 Wickeln des hybriden Brakeboosters

Wie schon zuvor, bei den nicht hybriden Brakeboostern, wird für den Wickelplan eine Durchmischung der benötigten Basis-Wickelmuster (4x A, 3x C, 1x H & 1x I) angestrebt. Da nicht alle Muster am gleichen Punkt starten, werden auch hier die Muster an den Übergängen teilweise unterbrochen und später zu Ende gewickelt. Somit ergibt sich folgender Wickelplan für den CFK-Einleger des hybriden Brakeboosters:



Mit diesem Wickelplan kann der Einleger des hybride Brakeboosters auf den identischen, bereits zuvor verwendeten Fadenträgern (siehe Abb. 6.6), mit der selben Fadenspannung von $F = 30 \text{ N}$ gewickelt werden. Auch dieser Einleger wird wieder bei $121 \text{ }^\circ\text{C}$, für 4 h und bei $-0,9 \text{ bar}$ Unterdruck ausgehärtet. Die CFK-Einleger des hybriden Brakeboosters weisen nach dem Entgraten eine Masse von $m = 3,00 \pm 0,07 \text{ Gramm}$ auf.

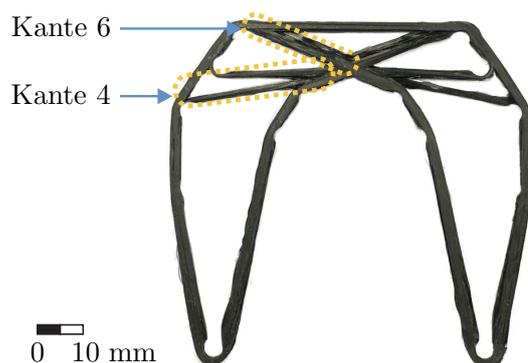


Abb. 7.4: Gewickelter CFK-Einleger des hybriden Brakeboosters vor dem Umspritzen mit geteilter Kante 4.

In Abbildung 7.4 ist der gewickelte CFK-Einleger des hybriden Brakeboosters vor dem Umspritzen zu sehen. Wie schon beim angepassten, anisotrop topologieoptimierten Brakebooster (b2), kommt es im Bereich der Kante 4 zu einer Teilung der TowPreg-Stränge. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wickelmuster C und H mit der Umwicklung von unterschiedlichen Pins die Kante 4 darstellen.

7.3 Hybridisierung des Demonstrators

7.3.1 Niederdruckplasmabehandlung

Für die Niederdruckplasmabehandlung des Brakeboosters werden die Ergebnisse aus Kapitel 5 dieser Arbeit genutzt. Die höchste Interface-Festigkeit konnte bei den hybriden Probekörpern mit einer 45-minütigen Behandlung im Luftplasma erzeugt werden. Für die Vorbehandlung des Brakeboosters wird wieder eine Plasma-Anlage vom Typ *Femto* der Firma *Diener Electronics* genutzt. Aufgrund der Geometrie und Größe der Plasmakammer, werden immer drei Brakebooster gleichzeitig vorbehandelt.

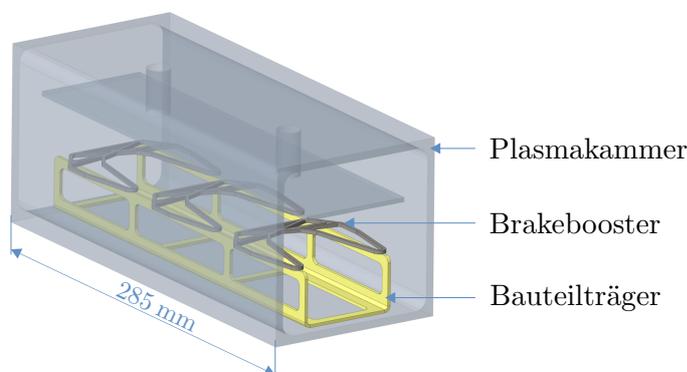


Abb. 7.5: CAD-Modell der Plasmakammer mit Bauteilträger und Brakeboostern zur Vorbehandlung im Niederdruckplasma.

Die Brakebooster werden für die Behandlung auf einen eigens gefertigten Bauteilträger gelegt (siehe Abb. 7.5). Dabei wird darauf geachtet, dass so wenig Kontaktfläche wie möglich, zwischen dem Bauteilträger und den Brakeboostern vorhanden ist (da hier die Plasmabehandlung nicht wirken kann). Damit kein Bereich des Bauteils unbehandelt bleibt, wird der Brakebooster nach 22,5 Minuten gewendet. Somit werden alle Bereiche des Brakeboosters mit Plasma vorbehandelt. Lediglich in einem kleinen Bereich von wenigen Quadratmillimetern wird nur mit der Hälfte der benötigten Zeit behandelt (22,5 Minuten). Dies wird allerdings keinen signifikanten Nachteil haben, da in den Versuchen aus Kapitel 5 gezeigt wurde, dass sich die Interface-Festigkeit nur geringfügig zwischen einer 15- und 45-minütigen Behandlungsdauer unterscheidet.

7.3.2 Umspritzen

Die vorbehandelten Brakebooster werden, wie die Proben zuvor, am nächsten Tag im Spritzgussprozess umspritzt. Hierfür wird das zuletzt verwendete PA6GF30 der Firma *Grodnamid* (siehe Tab. 3.1) genutzt. Die Düsentemperatur der Spritzgussmaschine beträgt dabei 275 °C, die Werkzeugtemperatur 80 °C, die Einspritzgeschwindigkeit 10 mm/s und der Einspritzdruck liegt zwischen 350 und 400 bar. Damit die Endkontur des hybriden Brakeboosters ohne aufwendige Nacharbeit erzeugt werden kann, wird wie bereits zuvor, ein Aluminium-Platzhalter für das Plattenwerkzeug genutzt. In diesem Platzhalter kann der gewickelte Brakebooster eingelegt werden (Abb. 7.6). Zusätzlich befinden sich im Platzhalter eingearbeitete Abstandshalter (0,6 mm Dicke), damit der Brakebooster nicht vollständig auf der Innenseite des Platzhalters aufliegt und darüber und darunter umspritzt werden kann. Nach dem Umspritzen wird der hybride Brakebooster vom Spritzgusskanal mit einer Trennscheibe für Kunststoffe abgetrennt.

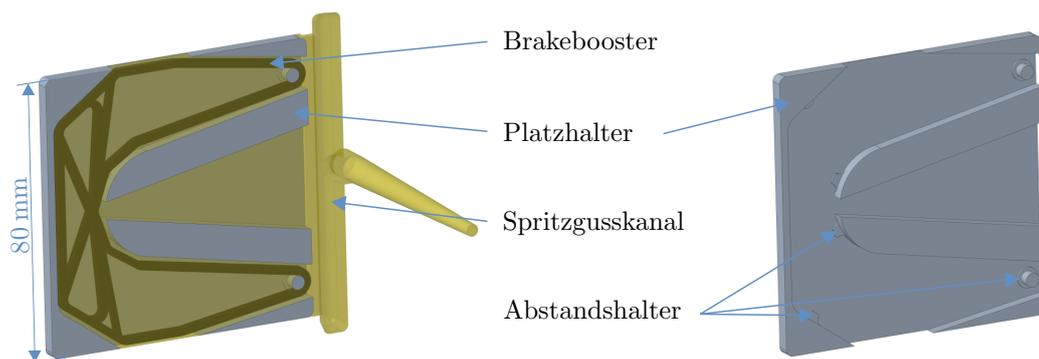


Abb. 7.6: CAD-Modell des Platzhalters im Spritzgussprozess mit Brakebooster und Spritzgussmaterial sowie Abstandshaltern im Platzhalter.

In Abbildung 7.7 ist zu erkennen, dass die CFK-Struktur nicht genau mittig umspritzt wird und teilweise frei liegt. Dies ist damit zu begründen, dass die Abstandshalter im Aluminium-Platzhalter zwar auf der einen Seite den Brakebooster zentrieren, auf der anderen Seite des Brakeboosters, liegt aber die Spiegelplatte des Spritzgusswerkzeuges direkt an. Auf dieser Spiegelplatte können im Rahmen dieser Arbeit keine Abstandshal-

ter angebracht werden. Aus diesem Grund wird der Brakebooster im Spritzgussprozess leicht verschoben und deshalb gegen diese Werkzeughälfte gepresst.

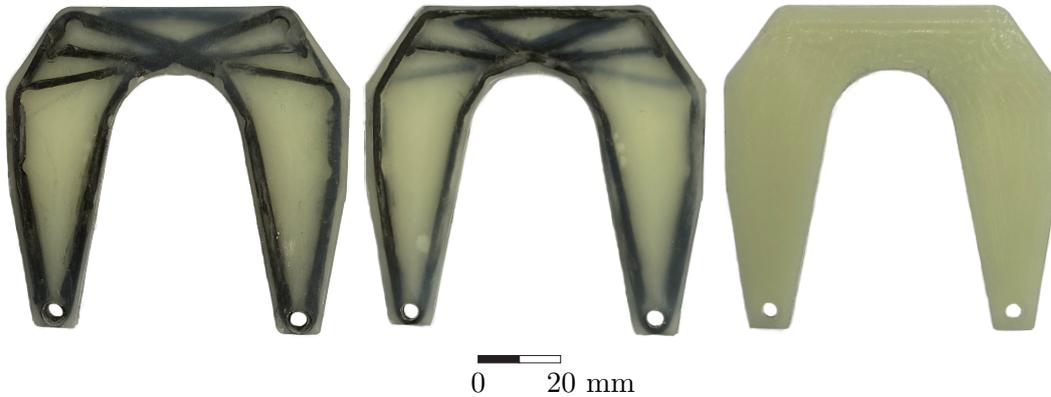


Abb. 7.7: Vorder- und Rückseite des zugeschnittenen, hybriden Brakebooster (b3) aus endloskohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz und kurzglasfaserverstärktem Polyamid 6 (links & mitte) sowie ein Brakebooster aus PA6GF30 (b5) ohne Endlosfaserverstärkung (rechts).

Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich der Abstand der beiden TowPreg-Stränge im Bereich der Kante 4 vergrößert hat. Dies liegt daran, dass aufgrund der hohen Drücke im Spritzgussprozess, der obere TowPreg-Strang leicht verschoben wurde. Dieses Phänomen tritt allerdings nicht bei allen Probekörpern auf, aber teilweise auch in anderen Bereichen des Brakeboosters. Für den hier gezeigten Demonstrator stellt dies, aufgrund der vorgegebenen Belastung, kein Problem dar. Bei anderen Bauteilgeometrien & -belastungen muss dies allerdings berücksichtigt und vermieden werden.

Um den Einfluss der Plasmabehandlung auf die Bauteilsteifigkeit zu untersuchen, werden auch nicht-vorbehandelte CFK-Brakebooster umspritzt (Variante b4). Die CFK-Einleger werden hier nur gereinigt, nicht aber im Niederdruckplasma vorbehandelt. Bei diesen Brakeboostern kann die stoffschlüssige Anbindung der Endlosfaserverstärkung an das Spritzgussmaterial vernachlässigt werden. Somit kann hier die Kraftübertragung nahezu ausschließlich über Kraft- und Formschluss stattfinden. Dadurch kann eine Aussage bezüglich der Wirksamkeit der Vorbehandlungsmethode auf Bauteilebene getroffen werden. Diese Aussage ist allerdings stark vom jeweiligen Bauteil abhängig und nicht allgemeingültig.

Des Weiteren werden, zusätzlich zu den beiden hybriden Brakeboostern, auch Brakebooster ohne gewickeltem CFK-Einleger, mit den gleichen Aluminium-Platzhaltern, gefertigt (Variante b5). Es handelt sich also um Brakebooster aus PA6GF30, ohne Endlosfaserverstärkung. Diese dienen zusätzlich als Referenz bei der Ermittlung der spezifischen Steifigkeit.

Mit dem vorhandenen Aluminium-Platzhalter lassen sich die gewickelten Brakebooster relativ gut umspritzen. Das Spritzgussmaterial verteilt sich gut in allen Bereichen des Brakeboosters und fließt auch an den unterschiedlich dicken Querstreben (Kante 4 und 6) gut vorbei. Auch die Einspritzung über die drei vorgegebenen Stellen im Aluminium-Platzhalter, ist sehr gut durchführbar. Die Reproduzierbarkeit in der Fertigung ist

allerdings etwas kritisch zu bewerten, da es bei einigen Brakeboostern zu Verformungen der gewickelten Struktur kommt. Für ein gleichmäßiges Ergebnis im Spritzgussprozess, sollte ein passendes Spritzgusswerkzeug, ohne Aluminium-Platzhalter, genutzt werden.

7.4 Test und Vergleich

Der Testaufbau für den hybriden Brakebooster ist identisch zum bereits gezeigten Aufbau aus Abbildung 6.7 des vorherigen Kapitels. Auch der Versuchsablauf bleibt identisch. Es wird weiterhin eine Vorkraft von 2 N angefahren und mit einer Verfahrgeschwindigkeit von 5 mm/min geprüft. Die Steifigkeit der Brakebooster wird mit Hilfe der Sekantensteigung im unteren Bereich des Kraft-Weg-Diagramms ermittelt, die bei allen drei Varianten (b3-b5), zwischen 10 und 50 N liegt. Die Festigkeit wird in diesem Versuch nicht betrachtet.

In Tabelle 7.2 ist eine finale Übersicht über unterschiedliche Varianten des Brakeboosters, inklusive der optimierten gewickelten Variante (b2), der hybriden vorbehandelten Variante (b3), der hybriden nicht-vorbehandelten Variante (b4) und der spritzgegossenen Variante (b5) dargestellt. Vom plasmabehandelten, hybriden Brakebooster (b3) werden insgesamt fünf Stück getestet, von der nicht-vorbehandelten Variante (b4) vier Stück sowie von der spritzgegossenen Variante (b5) auch fünf Stück.

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die spezifische Steifigkeit der hybriden Brakebooster (b3) nur 5 % niedriger ist, als bei den gewickelten Brakeboostern (b2). In Anbetracht der höheren Masse bedeutet dies, dass das Spritzgussmaterial, wie gewünscht, als lasttragende Komponente im hybriden Bauteil fungiert. Die Masse an CFK im hybriden Brakebooster b3 beträgt dabei $m_{CFK} = 3,0 \pm 0,1$ Gramm und beim gewickelten Brakebooster b2 $m_{CFK} = 3,5 \pm 0,1$ Gramm.

Tab. 7.2: Abschließender Vergleich der gewickelten Brakeboostern (b2), den hybriden plasmabehandelten Brakeboostern (b3), den hybriden nicht-vorbehandelten Brakeboostern (b4) und den spritzgegossenen Brakeboostern (b5).

	Wickeln b2	Hybrid b3	Hybrid b4	Spritzguss b5
Material	CFK (HT)	CFK(HT) PA6GF30	CFK(HT) PA6GF30	PA6GF30
Gesamtmasse [g]	$3,5 \pm 0,1$	$14,9 \pm 0,1$	$14,9 \pm 0,1$	$14,7 \pm 0,2$
Masse CFK [g]	$3,5 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	$3,0 \pm 0,1$	-
spez. Steifigkeit [N/mm/g]	$5,7 \pm 0,5$	$5,4 \pm 0,4$	$4,4 \pm 1,3$	$2,5 \pm 0,1$

Der Nutzen der Plasmavorbehandlung kann durch einen Vergleich der Varianten b3 und b4 erkannt werden. Die hybriden Brakebooster mit plasmabehandelter CFK-Struktur weisen eine 23 % höhere spezifische Steifigkeit auf. Es ist allerdings zu erwähnen, dass

die Standardabweichung bei Variante b4 um einiges höher ist, als bei den anderen Versuchsreihen.

Durch den Vergleich der Varianten b3 (hybrider, plasmabehandelte Brakebooster) und b5 (spritzgegossene Brakebooster) ist zu sehen, dass bei nahezu identischer Gesamtmasse, die spezifische Steifigkeit um mehr als das Doppelte ansteigt. Somit kann durch einen gezielten Einsatz von CFK (ca. 20 % Masseanteil am hybriden Brakebooster) die spezifische Steifigkeit eines spritzgegossenen Brakeboosters stark erhöht werden.

Des Weiteren soll hier noch auf das Versagensverhalten der Brakebooster eingegangen werden. Alle in diesem Kapitel vorgestellten Brakebooster (b3-b5) wurden am Tag nach dem Spritzgussgießen geprüft. Das Polyamid 6 hat also keine signifikante Feuchtigkeitsaufnahme erfahren. Dies ist auch im Bruchverhalten zu erkennen. Die spritzgegossenen Brakebooster (b5) haben ein sprödes Bruchbild und versagen dementsprechend plötzlich im Versuch und brechen in zwei Hälften. Hingegen haben beide hybride Varianten (b3 & b4) ein sehr gutmütiges Versagensverhalten. Hier kommt es auch zu einem Abfall der Tragfähigkeit des Bauteils und zu einer Beschädigung des Brakeboosters, allerdings bleiben die Lasteinleitungspunkte des Brakeboosters über die Endlosfasern weiterhin verbunden, wodurch dieser eine Resttragfähigkeit aufweist.

7.5 Zwischenfazit

Mit Hilfe der hybriden Demonstratoren (Brakebooster) konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, hybride duroplastisch-thermoplastische Strukturbauteile mit Hilfe des roboterbasierten 3D-Wickelf Verfahrens und dem thermoplastischen Spritzgießen zu fertigen. Dabei können Bauteile mit hoher spezifischer Steifigkeit, bei einem geringen Anteil von Endloskohlenstofffasern, erzeugt werden, welche mehrere Vorteile aufweisen. Zum einen kann durch den Spritzgussprozess die nicht optimale Bauteilqualität von gewickelten Bauteilen verbessert werden. Dies führt zu einem größeren Einsatzspektrum von roboterbasierten, dreidimensional gewickelten Bauteilen. Zum anderen kann durch den Einsatz einer duroplastischen Endlosfaserverstärkung, die spezifische Steifigkeit eines spritzgegossenen Bauteils um das Zweifache gesteigert werden. Dies führt zu einer Aufwertung von spritzgegossenen Bauteilen, vor allem in Hinblick auf die maximalen Festigkeits- und Steifigkeitswerte. Zusätzlich wird das Bruchverhalten der spritzgegossenen Bauteile von einem plötzlichen, sprödem Versagen, hin zu einem Versagen mit vorhandener Resttragfähigkeit verbessert.

Es konnte aber auch gezeigt werden, dass für die Fertigung von hybriden DP-TP Strukturen ein, auf die Eigenschaften der CFK-Struktur, angepasstes Werkzeug genutzt werden sollte. Somit können einige Einschränkungen, vor allem geometrische Abmessungen der Wickelstruktur, umgangen werden. Des Weiteren sollte neben der spezifischen Steifigkeit der hybriden Bauteile auch deren Festigkeit charakterisiert werden, was eine bessere Aussage über die Wirksamkeit der Vorbehandlung mit luftbasiertem Niederdruckplasma liefert.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Zielkonflikt bei der Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen ist oft zwischen dem Grad der Automatisierung und der Designfreiheit der Bauteile zu finden. Um diesen Konflikt zu entschärfen, wurde in dieser Arbeit ein neuartiges Fertigungsverfahren vorgestellt, welches das roboterbasierte 3D-Faserwickeln von TowPreg mit dem thermoplastischen Spritzgussprozess kombiniert. Hierfür wurde die Hybridisierung von endloskohlenstofffaserverstärktem, duroplastischem TowPreg mittels kurzglasfaserverstärktem Polyamid 6 untersucht um die Bauteilqualität von roboterbasiert gewickelten Strukturen zu verbessern und um die mechanischen Eigenschaften von Spritzgussbauteilen zu erhöhen.

Zu Beginn wurde hierfür der roboterbasierte 3D-Faserwickelprozess genauer untersucht und eine entsprechende Anlage konzipiert. Es konnte gezeigt werden, dass mit einer passenden Anlage, welche die Fadenspannung auch bei komplexen Bewegungen des Roboters und des Fadenträgers konstant hält, topologieoptimierte, fachwerkartige Strukturen gewickelt werden können. Durch die Aufteilung von Bauteilen in Wickelmustern und der strukturierten Generierung von Basis-Wickelmustern kann computerbasiert die optimale Anzahl der benötigten Basis-Wickelmuster berechnet werden. Damit sind lastpfadoptimierte Bauteile mit guten spezifischen mechanischen Eigenschaften, in einem roboterbasierten Prozess, wiederholgenau herstellbar. Durch die Erweiterung der Anlage um eine neu entwickelte Trenn- und Anlegeeinheit kann gezeigt werden, dass die Anzahl der TowPreg-Stränge lokal variiert und an die lokalen Erfordernisse angepasst werden kann. Dies geschieht vollautomatisch während des Wickelprozesses. Der Einfluss der Fadenspannung im Wickelprozess auf Druckprobekörper, welche in einem neuen In-situ Wickelprozess gefertigt wurden, konnte im untersuchten Bereich nicht nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse belegen die zu Beginn der Arbeit aufgestellten Annahmen der ersten Hypothese (Wickeln von topologieoptimierten Strukturen mittels computerbasiert generierten Wickelmustern).

Um die Nachteile gewickelter Strukturen zu umgehen, wie etwa die ineffiziente Darstellung von geschlossenen Oberflächen oder die schlechte Oberflächenqualität, sowie die mechanischen Eigenschaften von spritzgegossenen Bauteilen zu erhöhen, sollen diese Strukturen umspritzt werden. Auch kann dadurch der Anteil von Endloskohlenstoffa-

sen gesenkt werden, da das Spritzgussmaterial lasttragende Funktionen übernimmt. Hierfür wurde mit Hilfe der Vorbehandlung im Niederdruckplasmaverfahren ein Faser-Interface erzeugt, welches durch die Freilegung der Endlosfasern des gewickelten Bauteils und durch Aktivierung der Oberflächenstruktur, eine hoch belastbare Verbindung der beiden artfremden Kunststoffgruppen ermöglicht. Es konnten mit Hilfe eines eigens entwickelten Auszugsversuches, bei welchem die CFK-Proben roboterbasiert gefertigt wurden, Interface-Festigkeiten von bis zu $\bar{\tau} = 15,1 \pm 1,1$ MPa ermittelt werden. Dies entspricht einer Steigerung um den Faktor 6,9, im Vergleich zu unbehandelten Proben und liegt im Bereich der Festigkeiten von strukturellen Klebungen. Die Freilegung der Endlosfasern und somit der Nachweis der Erzeugung eines Faser-Interfaces konnte mittels Schliffproben erbracht werden. Damit konnte die zweite aufgestellte Hypothese aus Kapitel 3 verifiziert werden, die angibt, dass es möglich ist, mit Hilfe einer Vorbehandlung im Niederdruckplasmaverfahren, hybride DP-TP Strukturbauteile belastbar über ein Faser-Interface zu verbinden.

Abschließend wurden mit diesem Wissen Demonstratoren in Form von sogenannten Brakeboostern gefertigt. Dabei wurde ein anisotrop topologieoptimierter Brakebooster für Referenzzwecke hergestellt und geprüft. Im Anschluss daran wurde der hybrid topologieoptimierte Brakebooster gewickelt, vorbehandelt und umspritzt. Dieser hybride Brakebooster hat eine fast genauso hohe spezifische Steifigkeit wie der gewickelte, nicht-umspritzte Brakebooster ($c_{b2} = 5,7 \pm 0,5$ N/mm/g zu $c_{b3} = 5,4 \pm 0,4$ N/mm/g). Es wird jedoch 14 % weniger CFK Masse benötigt. Im Vergleich zu einem spritzgegossenen Brakebooster ohne Endlosfaserverstärkung, weist der hybride Brakebooster, bei nahezu identischer Masse, eine mehr als doppelt so hohe spezifische Steifigkeit auf. Diese Versuche, sowie die zu Beginn der Arbeit untersuchten Punkte zum roboterbasierten 3D-Faserwickeln, bestätigt neben der ersten Hypothese auch die dritte Hypothese (eine Hybridisierung ermöglicht ein Fertigungsverfahren für Bauteile mit hohen spezifischen Steifigkeitswerten), die am Anfang der Arbeit aufgestellt wurde.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können abschließend in zwei Varianten genutzt werden. Eine Variante ist, wie bereits erwähnt, die Verbesserung des 3D-Wickelffahrens durch das Spritzgussmaterial. Es können effizient geschlossene Strukturen abgebildet werden, die gewickelte Struktur kann vereinfacht werden, die Bauteilqualität nimmt zu und das Bauteil kann durch das Anspritzen von beispielsweise Montage-Clips funktionalisiert werden. Es kann aber auch aus der anderen Richtung argumentiert werden. Durch den Einsatz von geringen Mengen endloskohlenstofffaserverstärktem Duroplast können die spezifischen Eigenschaften von spritzgegossenen Strukturbauteilen stark gesteigert werden. Es konnte somit gezeigt werden, dass man artfremde Kunststoffe belastbar und technologisch sinnvoll zusammenbringen kann. Unabdingbar dafür sind eine hybride Topologieoptimierung und eine computerbasierte Generierung von Wickelmustern.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Im Bereich der Wickeltechnik sollte der Einfluss der Fadenspannung bei der Nutzung von TowPreg auf die mechanischen Eigenschaften weiter untersucht werden, da dies einer der wichtigsten Prozessparameter beim Wickeln von Bauteilen ist. Auch sollte die automatisierte Trenn- und Anlegeeinheit weiterentwickelt werden, da-

mit diese eine Verbindung der beiden TowPreg-Stränge, unabhängig vom Tack des Materials, nach dem Durchtrennen ermöglicht. Die Erzeugung von Basis-Wickelmustern sollte auf nicht-fachwerkartige Strukturen erweitert oder angepasst werden und auch vollautomatisch generiert werden, damit ein größeres Einsatzspektrum des roboterbasierten 3D-Wickelfahrens ermöglicht wird. Im Bereich der Hybridisierung müssen die erzeugten chemischen Bestandteile durch die Niederdruckplasmabehandlung genauer definiert werden und deren Beitrag zur Interface-Festigkeit isolierter betrachtet werden. Abschließend sollen diese Erkenntnisse auch anhand eines Demonstrators überprüft werden, für welchen ein eigens auf die Anforderungen des hybriden Prozesses gefertigtes Spritzgusswerkzeug genutzt werden sollte. Hierbei muss, neben der Steifigkeit, auch die Festigkeit sowie das Versagensverhalten hybrider Strukturbauteile genauer untersucht werden. Dies soll die Wirksamkeit der Vorbehandlung im Niederdruckplasmaverfahren genauer beurteilen und den positiven Einfluss der Endlosfaserverstärkung auf das Versagensverhalten von hybriden DP-TP Strukturen charakterisieren.

Schrifttum

- [1] I. Müller. Leichtbau und Smart Structures - Kaptiel 1: Einführung in den Leichtbau. *Vorlesungsskript Hochschule Pforzheim*, 2020.
- [2] TCR Composites Inc. *UF3325 TCR Resin System, Datenblatt: TDS-RD-0104-R001-UF3325*, 2022.
- [3] Lanxess Performance Materials GmbH. Durethan B31SKH3.0. *Datenblatt*, 2022.
- [4] Lanxess Performance Materials GmbH. Durethan BKV50H3.0. *Datenblatt*, 2022.
- [5] H. Schürmann. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. *Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg*, 2007.
- [6] E. Witten and V. Mathes. Der europäische Markt für Faserverstärkte Kunststoffe / Composites 2021. 2022.
- [7] H. Friedrich. Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2013.
- [8] H. Lengsfeld, J. Lacalle, T. Neumeyer, and V. Altstädt. Faserverbundwerkstoffe. *Carl Hanser Verlag: München*, 2020.
- [9] M. Bonnet. Kunststofftechnik. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2014.
- [10] H. Sukanto, W.W. Raharjo, D. Ariawan, J. Triyono, and M. Kaavesina. Epoxy resins thermosetting for mechanical engineering. *Open Engineering*, 11(1):797–814, 2021.
- [11] W.J. Jones and W.J. Orville-Thomas. The infra-red spectrum and structure of dicyandiamide. *Trans. Faraday Soc.*, 55:193–202, 1959.
- [12] Lanxess Deutschland GmbH. Die Zwillinge unter den Polyamiden. *Technische Information*, TI 2009-017 DE, 2009.
- [13] H. Briehl. Chemie der Werkstoffe. *Springer Fachmedien: Wiesbaden*, 2021.
- [14] W. Weißbach, M. Dahms, and C. Jaroschek. Werkstoffe und ihre Anwendungen. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2018.

- [15] C.J.G. Plummer, P.-E. Bourban, and J.-A.E. Manson. Polymer Matrix Composites: Matrices and Processing. In K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan, and P. Veyssi ere, editors, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pages 7388–7396. Elsevier, Oxford, 2001.
- [16] M. Wacker, P. Trawiel, and G.W. Ehrenstein. Hartung von Reaktionsharzen. *FAU Erlangen-Nurnberg, Lehrstuhl fur Kunststofftechnik*, 2017.
- [17] M. F. Ashby and Y. J. M. Br echet. Designing hybrid materials. *Acta Materialia*, 51(19):5801–5821, 2003.
- [18] M. Nanko. Definitions and Categories of Hybrid Materials. *Adv. in Tech. of Mat. and Mat. Proc. J.*, 11(1):1–8, 2009.
- [19] D. Hummelberger. *Hybride Werkstoffsysteme*. PhD thesis, Karlsruher Institut fur Technologie, 2018.
- [20] B. Koch, G. Knozinger, T. Pleschke, and H. J. Wolf. Hybrid-Frontend als Strukturbauteil. *Kunststoffe*, 89(3):82–86, 1999.
- [21] H. F. Wu, L. L. Wu, W. J. Slagter, and J. L. Verolme. Use of rule of mixtures and metal volume fraction for mechanical property predictions of fibre-reinforced aluminium laminates. *Journal of Materials Science*, 29:4583–4591, 1994.
- [22] P. Hirsch, M. John, D. Leipold, A. Henkel, S. Gipser, R. Schlimper, and M. Zscheige. Numerical Simulation and Experimental Validation of Hybrid Injection Molded Short and Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers*, 13:3846, 2021.
- [23] K. Mehl, S. Schmeer, N. Motsch-Eichmann, P. Bauer, I. Mueller, and J. Hausmann. Structural Optimization of Locally Continuous Fiber-Reinforcements for Short Fiber-Reinforced Plastics. *Journal of Composites Science*, 5:118, 2021.
- [24] E. Stelldinger, A. Kuehhorn, and M. Kober. Experimental evaluation of the low-velocity impact damage resistance of CFRP tubes with integrated rubber layer. *Composite Structures*, 139:30–35, 2016.
- [25] S. Nissle. *Zur Kraftubertragung zwischen NiTi-Formgedachtnislegierungen und Faserkunststoffverbunden in aktiven Hybridstrukturen*. PhD thesis, TU Kaiserslautern, 2019.
- [26] H. Paul, M. Luke, and F. Henning. Kunststoff-Metall-Hybridverbunde - Experimentelle Untersuchungen zum Verformungs- und Versagensverhalten. *Zeitschrift Kunststofftechnik*, 10:117–141, 2014.
- [27] G. Habenicht. Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. *Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg*, 2009.

- [28] M. Doobe (Hrsg.). Kunststoffe erfolgreich kleben. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2018.
- [29] P. Wagner, F. Diljak, and C. Hopmann. Wie durch Mikroformschluss Kunststoff/Metall-Hybride entstehen. *Plastverarbeiter.de*, URL: bit.ly/3RbPof8 (Abruf: 24.09.2022), 2022.
- [30] M. Grujicic, V. Sellappan, M.A. Omar, N. Seyr, A. Obieglo, M. Erdmann, and J. Holzleitner. An overview of the polymer-to-metal direct-adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components. *Journal of Materials Processing Technology*, 197(1):363–373, 2008.
- [31] Plasma Technology GmbH (Hrsg.). Plasmawissen - Das kompetente Nachschlagewerk der Plasmatechnik. 2016.
- [32] H. Heuermann. Mikrowellentechnik: Feldsimulation, nichtlineare Schaltungstechnik, Komponenten und Subsysteme, Plasmatechnik, Antennen und Ausbreitung. *Springer Fachmedien: Wiesbaden*, 2020.
- [33] D. M. Manos and D. L. Flamm. Plasma Etching. *Academic Press: San Diego*, 1989.
- [34] Diener electronics GmbH + Co. KG (Hrsg.). Plasmatechnik. 2011.
- [35] U. Stoehr. Oberflächenaktivierung von Kunststoffen mittels Plasma zur Haftvermittlung. *Vakuum in Forschung und Praxis*, 27(2):16–21, 2015.
- [36] A. Bismarck, M. Kumru, and J. Springer. Influence of Oxygen Plasma Treatment of PAN-Based Carbon Fibers on Their Electrokinetic and Wetting Properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 210:60–72, 1999.
- [37] R. Akkerman, M. Bouwman, and S. Wijskamp. Analysis of the Thermoplastic Composite Overmolding Process: Interface Strength. *Front. Mater.*, 7(27), 2020.
- [38] Y. N. Becker. *Development and investigation of a thermoplastic composite spinal implant under consideration of the interface between short and endless fibre reinforcement*. PhD thesis, TU Kaiserslautern, 2020.
- [39] D. Häffelin, N. Majic, S. Bockelkamp, and H. Fischer. Series Production of Fiber Composite Safety Components for the Automotive Industry. *Lightweight Design Worldwide*, 11:46–51, 2018.
- [40] J. Haas, O. N. Hassan, B. Beck, L. Kärger, and F. Henning. Systematic approach for finite element analysis of thermoplastic impregnated 3D filament winding structures – General concept and first validation results. *Composite Structures*, 268:113964, 2021.

- [41] M. Holzinger, C. Loy, M. Gruber, K. Kugler, and V. Buehler. 3D Winding of Tailor-made Thermoplastic Rods for Locally Reinforced Injection Molded Components. In *ITHEC2020, 5th International Conference and Exhibition on Thermoplastic Composites*, pages 92–95, 2020.
- [42] S. Y. Lee and G. S. Springer. Filament Winding Cylinders: III. Selection of the Process Variables. *Journal of Composite Materials*, 24:1270–1298, 1990.
- [43] J. V. Milewski and R. V. Dominik. History of Reinforced Plastics. *Journal of Macromolecular Science - Chemistry*, 15(7):1303–1343, 1981.
- [44] AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.). Handbuch Faserverbundwerkstoffe. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2013.
- [45] A. Andrianov, E. K. Tomita, C. A. G. Veras, and B. Telles. A Low-Cost Filament Winding Technology for University Laboratories and Startups. *Polymers*, 14:1066, 2022.
- [46] T. Sofi, S. Neunkirch, and R. Schledjewski. Path calculation, technology and opportunities in dry fiber winding: a review. *Advanced Manufacturing: Polymer and Composite Science*, 4(3):57–72, 2018.
- [47] Commercial Vehicle Cluster Nutzfahrzeug GmbH (Hrsg.). Hocheffiziente Druckbehälterherstellung. *cvcnews*, 2, 2020.
- [48] N. Minsch, F. H. Herrmann, T. Gereke, A. Nocke, and C. Cherif. Analysis of filament winding processes and potential equipment technologies. *Procedia CIRP*, 66:125–130, 2017.
- [49] M. Quanjin, M.R.M. Rejab, M. S. Iris, N. M. Kumar, and M.N.M. Merzuki. Robotic Filament Winding Technique (RFWT) in Industrial Application: A Review of State of the Art and Future Perspectives. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(12):1668–1676, 2018.
- [50] P. Bauer, Y. N. Becker, N. Motsch-Eichmann, K. Mehl, I. Mueller, and J. Hausmann. Hybrid thermoset-thermoplastic structures: An experimental investigation on the interface strength of continuous fiber-reinforced epoxy and short-fiber reinforced polyamide 6. *Composites Part C: Open Access*, 3:100060, 2020.
- [51] P. Bauer, N. Motsch-Eichmann, S. Schmeer, K. Mehl, J. Hausmann, and I. Mueller. A novel hybrid thermoset-thermoplastic robot-based production concept for lightweight structural parts: A special view on 3d filament winding. In *5th Hybrid Materials and Structures 2022 - Book of Abstracts*, pages 15–22, 2022.
- [52] N. Akkus and G. Genc. Influence of pretension on mechanical properties of carbon fiber in the filament winding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91:3583–3589, 2017.

- [53] T. Imamura, K. Akamine, S. Honda, K. Terashima, and H. Takemoto. Modeling and tension control of filament winding process. *IFAC Proceedings*, 35(1):13–18, 2002. 15th IFAC World Congress.
- [54] P. Mertiny and F. Ellyin. Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, (12):1615–1622, 2002.
- [55] W. Polini and L. Sorrentino. Influence of winding speed and winding trajectory on tension in robotized filament winding of full section parts. *Composites Science and Technology*, 65(10):1574–1581, 2005.
- [56] X. M. Xu, W. X. Zhang, X. L. Ding, M. Zhang, and S. H. Wei. Design and Analysis of a Novel Tension Control Method for Winding Machine. *Chin. J. Mech. Eng.*, 31:101, 2018.
- [57] C. Wang, R. Yang, Y. Wang, and H. Lu. Research on a precision tension control system with a magnetic particle clutch as the actuator. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 27:7–13, 2005.
- [58] Y. Cui and Z. Yin. Development of a tension system and influence of ultimate tension on the properties of composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 272, 2017.
- [59] L. Carrino, W. Polini, and L. Sorrentino. Modular structure of a new feed-deposition head for a robotized filament winding cell. *Composites Science and Technology*, 63(15):2255–2263, 2003.
- [60] I. Koustas, T. Papingiotis, G.-C. Vosniakos, and A. Dine. On the development of a filament winding robotic system. *Procedia Manufacturing*, 17:919–926, 2018. 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11-14, 2018, Columbus, OH, USA.
- [61] L. Sorrentino, W. Polini, L. Carrino, E. Anmateros, and G. Paris. Robotized Filament Winding of Full Section Parts: Comparison Between Two Winding Trajectory Planning Rules. *Advanced Composite Materials*, (17):1–23, 2008.
- [62] P. Mindermann, S. Bodea, A. Menges, and G. T. Gresser. Development of an Impregnation End-Effector with Fiber Tension Monitoring for Robotic Coreless Filament Winding. *Processes*, 9:806, 2021.
- [63] I. Mueller, M. Buergmann, J. Heimann, A. Stieglitz, C. Sohl, and V. Hoertdoerfer. Verfahren zum Herstellen eines Bauelements und Bauelement. *Patent DE 10 2017 222 579 A1*, 2019.
- [64] I. Mueller, J. Heimann, M. Buergmann, I. Lobo-Casanova, and A. Stieglitz. Vierpunktlenker. *Patent DE 10 2016 209 041 A1*, 2016.

- [65] S. Neunkirchen and R. Schledjewski. Tack measurement of bindered rovings for the dry fiber winding process. *Polymer Composites*, 42(9):4607–4616, 2021.
- [66] B. Beck and J. Haas. Dreidimensionale Faserskelette: Lokale Endlosfaserverstärkung durch die 3D-Skelett-Wickeltechnik. *Kunststoffe*, 09/2019:171–173, 2019.
- [67] D. Cohen. Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28(A):1035–1047, 1997.
- [68] P. Mertiny and F. Ellyin. Selection of optimal processing parameters in filament winding. In *Proceedings of 33rd International SAMPE Technical Conference*, pages 1084–1095, Proceedings of 33rd International SAMPE Technical Conference.
- [69] S. Y. Lee and G. S. Springer. Filament Winding Cylinders: I. Process Model. *Journal of Composite Materials*, 24:1344–1366, 1990.
- [70] M. Gutbrod. Towpregs zum fertigen Bauteil wickeln. *K-Extra*, 2017.
- [71] B. Deng, Y. Shi, T. Yu, and P. Zhao. Influence Mechanism and Optimization Analysis of Technological Parameters for the Composite Prepreg Tape Winding Process. *Polymers*, 12:1843, 2020.
- [72] X. He, Y. Shi, C. Kang, and T. Yu. Analysis and control of the compaction force in the composite prepreg tape winding process for rocket motor nozzles. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(2):836–845, 2017.
- [73] Y. D. Boon, S. C. Joshi, and S. K. Bhudolia. Review: Filament Winding and Automated Fiber Placement with In Situ Consolidation for Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites. *Polymers*, 13:1951, 2021.
- [74] H. Lu, M. Schlottermuller, N. Himmel, and R. Schledjewski. Effects of Tape Tension on Residual Stress in Thermoplastic Composite Filament Winding. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 18(6):469–487, 2005.
- [75] J. Romagna, G. Ziegmann, and M. Flemming. Thermoplastic filament winding—an experimental investigation of the on-line consolidation of poly(ether imide) fit preforms. *Composites Manufacturing*, 6(3):205–210, 1995. 3rd International Conference on Flow Processes in Composite Materials 94.
- [76] L.A. Dobrzański, J. Domaga, and J.F. Silva. Application of Taguchi method in the optimisation of filament winding of thermoplastic composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, 28(3):133–140, 2007.
- [77] R. Gennaro, F. Montagna, A. Maffezzoli, F. Fracasso, and S. Fracasso. On-line Consolidation of Commingled Polypropylene/Glass Roving During Filament Winding. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 24(6):789–804, 2011.

- [78] S. K. Kim, G. M. Kim, H. J. Kim, and W. I. Lee. An Experimental Study on the Thermoplastic Filament Winding Process using Commingled Yarns. *Advanced Composites Letters*, 11(2):67–71, 2002.
- [79] F. Henninger and K. Friedrich. Thermoplastic filament winding with online-impregnation. Part A: process technology and operating efficiency. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(11):1479–1486, 2002.
- [80] F. Henninger, J. Hoffmann, and K. Friedrich. Thermoplastic filament winding with online-impregnation. Part B. Experimental study of processing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(12):1684–1695, 2002.
- [81] S. Deng, L. Djukic, R. Paton, and L. Ye. Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68:121–132, 2015.
- [82] Y. Ding, H. Tang, W. Shi, Q. He, and Z. Zhai. Enhancement of interfacial strength of overmolded hybrid structures of short fiber reinforced polyamide 6 on continuous fiber reinforced epoxy composites under various surface pretreatments. *Polymer Composites*, 43(2):1038–1047, 2021.
- [83] O. Erartsin, J. S. M. Zanjani, and I. Baran. Unravelling the interphase - bond strength relationship in novel co-bonded thermoplastic - thermoset hybrid composites for leading edge protection of wind turbine blades. *Polymer Testing*, 117:107856, 2023.
- [84] N. Karakaya, M. Papila, and G. Özkoc. Effects of hot melt adhesives on the interfacial properties of overmolded hybrid structures of polyamide-6 on continuous carbon fiber/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139:106106, 2020.
- [85] N. Karakaya, M. Papila, and G. Özkoc. Overmolded hybrid composites of pa6 on continuous carbon and glass fiber/epoxy composites: An assessment of the interface. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 131:105771, 2020.
- [86] H. Kazan, S. Farahani, and S. Pilla. Feasibility Study for Manufacturing CF/Epoxy - Thermoplastic Hybrid Structures in a Single Operation. *Procedia Manufacturing*, 33:232–239, 2019.
- [87] H. Parmar, A. Gambardella, A. Perna, A. Viscusi, R. Gatta, F. Tucci, A. Astarita, and P. Carlone. Manufacturing and metallization of hacturing and metallization of hyybrid thermoplastic-thermoset matrixbrid thermoplastic-thermoset matrix composites. In *ESAFORM 2021. 24th International Conference on Material Forming.*, 2021.
- [88] P. N. Charlson, C. Longmont, C. R. Schwieters, and J. H. Souk. Laser joining of thermoplastic and thermosetting materials. *U.S. Patent 4,414,166*, 1983.

- [89] R. Schares. *Laserstrahl-Fügevorbereitung von CFK-Bauteilen in Formwerkzeugen von Spritzgießanlagen*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2020.
- [90] E. Tsiangou, S. T. Freitas, I. F. Villegas, and R. Benedictus. Recent Developments in Ultrasonic welding of Epoxy- to Thermoplastic-Based Composites. In *ITHEC*, 2020.
- [91] Z. Zhong and Q. Guo. Miscibility and cure kinetics of nylon/epoxy resin reactive blends. *Polymer*, 39(15):3451–3458, 1998.
- [92] M. Rawa and D. Kuttner. Stoffschlüssiges Fügen von faserverstärkten Duroplast-Thermoplast-Hybriden. *lightweight design*, 11:14–21, 2018.
- [93] H. Shi, J. Sinke, and R. Benedictus. Surface modification of PEEK by UV irradiation for direct co-curing with carbon fibre reinforced epoxy prepregs. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 73:51–57, 2017.
- [94] S. Marino, F. Mayer, A. Bismarck, and G. Czel. Effect of Plasma-Treatment of Interleaved Thermoplastic Films on Delamination in Interlayer Fibre Hybrid Composite Laminates. *Polymers*, (12):2834, 2020.
- [95] P. A. D. Rasmussen and J. M. Brown. Integral thermoset/thermoplastic composite joint. *U.S. Patent 5,667,881*, 1997.
- [96] H. Kazan. *Hybrid Single Shot Manufacturing of Multi-Materials Structure for Automotive Applications*. Dissertation, Clemson University, Clemson, 2019.
- [97] M. Goodarz, A. Behzadnia, and T. Dastan. Assessing the tensile properties of interlayer hybrid thermoset-thermoplastic composites. *Journal of Industrial Textiles*, 51(2):1754–1777, 2022.
- [98] J. M. Vazquez-Rodriguez, P. J. Herrera-Franco, and P.I. Gonzalez-Chi. Analysis of the interface between a thermoplastic fiber and a thermosetting matrix using photoelasticity. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38:819–827, 2007.
- [99] H. T. Oyama, T. N. Solberg, and J.P. Wightman. Electron microprobe analysis as a novel technique to study the interface between thermoset and thermoplastic polymers. *Polymer*, 40:3001–3011, 1999.
- [100] T. Chang. Plasma Surface Treatment In Composites Manufacturing. *Journal of Industrial Technology*, 15:1–7, 1998.
- [101] E. Lachner. *Behandlung von Carbonfasern mit Ammoniakplasma zur Oberflächenaktivierung*. Dissertation, Universität Augsburg, 2018.
- [102] H. Lee, I. Ohsawa, and J. Takahasi. Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbonfiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties. *Applied Surface Science*, 328:241–246, 2015.

- [103] K. Ma, P. Chen, B. Wang, G. Cui, and X. Xu. A Study of the Effect of Oxygen Plasma Treatment on the Interfacial Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 118:1606–1614, 2010.
- [104] A. Robeck. *Plasmabehandlung von Carbonkurzfasern zur Verbesserung der Zugfestigkeit von spritzgiessbaren kohlenstofffaserverstärkten Thermoplasten*. Dissertation, TU München, 2019.
- [105] J. Li. Interfacial studies on the O₃ modified carbon fiber-reinforced polyamide 6 composites. *Applied Surface Science*, 255:2822–2824, 2008.
- [106] L. F. Choong, K. Y. Cheong, S. Ramakrishnan, and A. F. Roslan. The adhesion of epoxy treated by microwave oxygen plasma. *Applied Surface Science*, 563:150224, 2021.
- [107] K. Mehl. Anisotrope und hybride Strukturoptimierung eines Brakeboosters. *Interner Bericht*, 2022.
- [108] J. Sabisch. *Konstruktion einer elektr. Imprägniereinheit und Entwicklung einer zentralen Bedieneinheit für eine TowPreg-Anlage*. Bachelorthesis, Hochschule Pforzheim, 2022.
- [109] M. Schaffraneck. *Entwicklung und Konstruktion einer Laboranlage zur Harzimpregnierung von Endlosfasern*. Bachelorthesis, Hochschule Pforzheim, 2020.
- [110] P. Schekies. *Entwicklung und Konstruktion eines Systems zur gezielten und variablen Einstellung des Faservolumengehaltes an einer Towpreg-Anlage*. Mastertesis, Hochschule Aalen, 2021.
- [111] K. Drechsler, I. Karb, R. Kehrlé, and V. Witzel. Faserverbundstrukturen – Leichtbau in Natur und Technik. *Themenheft Forschung - Leichtbau*, (3):14–21, 2007.
- [112] F. Henning and E. Moeller. Handbuch Leichtbau. *Carl Hanser Verlag: München, Wien*, pages 1–30, 2011.
- [113] A. Spickenheuer. *Zur fertigungsgerechten Auslegung von Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen für den extremen Leichtbau auf Basis desvariabelaxialen Fadenablageverfahrens Tailored Fiber Placement*. PhD thesis, TU Dresden, 2014.
- [114] J. D. Carvalho, M. Lossie, D. Vandepitte, and H. Van Brussel. Optimization of filament-wound parts based on non-geodesic winding. *Composites Manufacturing*, 6(2):79–84, 1995.
- [115] R. Wang, W. Jiao, W. Liu, F. Yang, and X. He. Slippage coefficient measurement for non-geodesic filament-winding process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(3):303–309, 2011.
- [116] N. Akkus, G. Genc, and C. Girgin. Control of the pretension in filament winding process. *acta mechanica et automatica*, 2(3):5–10, 2008.

- [117] A. Hartung. *Entwicklung und Umsetzung eines Fadenspannungssystems zum Wickeln 3-dimensionalen Bauteilen [sic] mit Hilfe einer TowPreg-Wickelanlage*. Bachelorthesis, Hochschule Pforzheim, 2021.
- [118] D. Cohen, S. C. Mantell, and L. Zhao. The effect of fiber volume fraction on filament wound composite pressure vessel strength. *Composites Part B: Engineering*, 32:413–429, 2001.
- [119] A. Blachut, T. Wollmann, M. Panek, M. Vater, J. Kaleta, J. Detyna, S. Hoschützky, and M. Gude. Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite vessels. *Composite Structures*, 303:116337, 2022.
- [120] G. J. Dvorak and P. Prochazka. Thick-walled composite cylinders with optimal fiber prestress. *Composite Part B: Engineering*, 27(B):643–649, 1996.
- [121] G. J. Dvorak, P. Prochazka, and M. V. Srinivas. Design and fabrication of submerged cylindrical laminates - I. *International Journal of Solids and Structures*, 36:3917–3943, 1999.
- [122] M. V. Srinivas, G. J. Dvorak, and P. Prochazka. Design and fabrication of submerged cylindrical laminates - II. *International Journal of Solids and Structures*, 25(36):3945–3976, 1999.
- [123] H. M. Hsiao and I. M. Daniel. Effect of fiber waviness on stiffness and strength reduction of unidirectional composites under compressive loading. *Composites Science and Technology*, 56(5):581–593, 1996.
- [124] H. M. Hsiao and I. M. Daniel. Strain rate behavior of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 29(5):521–533, 1998.
- [125] A. Krimmer. *Mikromechanische Modellierung von Fasergelege-Kunststoff-Verbunden auf Basis von Normprüfungen unter Berücksichtigung der in-situ-Eigenschaften der Matrix*. Dissertation, TU Berlin, 2014.
- [126] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 14126:1999 – Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene. *DIN e.v., Berlin*, 2000.
- [127] M. Rahimy-Barhogy. *Charakterisierung und Untersuchung von unterschiedlichen TowPreg-Materialien für das robotergestützte 3D-Faserwickelverfahren*. Bachelorthesis, Hochschule Pforzheim, 2020.
- [128] R. G. Dietrich. *Analyse der Wärmeausdehnungs-Inkompatibilität bei Klebverbindungen aus CFK, Stahl und Aluminium bei der Fertigung einer lackierten Karosserie*. PhD thesis, TU München, 2018.
- [129] TCR Composites Inc. *UF3376 TCR Resin System, Datenblatt: TDS-RD-0010-R012-UF3376*, 2022.

- [130] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 527-5:2010-01 – Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 5: Prüfbedingungen für unidirektional faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe. *DIN e.v., Berlin*, 2010.
- [131] ZwickRoell. Produktinformation - Hydraulische Druckvorrichtung für Verbundwerkstoffe HCCF (PI574 422). 2022.
- [132] R. Diestel. Graphentheorie. *Springer Spektrum: Berlin, Heidelberg*, 2017.
- [133] K. Mönius, J. Steuding, and P. Stumpf. Algorithmen in der Graphentheorie. *Springer Spektrum: Wiesbaden*, 2021.
- [134] K. Mönius, J. Steuding, and P. Stumpf. Einführung in die Graphentheorie. *Springer Spektrum: Wiesbaden*, 2021.
- [135] G. Kemper and F. Reimers. Lineare Algebra. *Springer Spektrum: Berlin, Heidelberg*, 2022.
- [136] D. Logofatu. Grundlegende Algorithmen mit Java. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2014.
- [137] A. Schulz. Grundlagen der Theoretischen Informatik. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2022.
- [138] G. Sand and I. Müller. Optimierung der Wickelmuster mit Hilfe von GAMS. *Internes Gespräch*, 22.11.2022.
- [139] C. Grimme and J. Bossek. Einführung in die Optimierung. *Springer Vieweg: Wiesbaden*, 2018.
- [140] D. Wetjen. *Wechselwirkung von Carbonfasern, Schlichte und epoxidbasierter polymerer Matrix in carbonfaserverstärkten Kunststoffen*. Dissertation, Universität Augsburg, 2016.
- [141] M. Sharma, S. Gao, E. Maeder, H. Sharma, L. Y. Wei, and J. Bijwe. Carbon fiber surfaces and composite interphases. *Composites Science and Technology*, 102:35–50, 2014.
- [142] A. Kopczynska and G. W. Ehrenstein. Oberflächenspannung von Kunststoffen: Messmethoden am LKT. *FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik*, 2017.
- [143] A. Kafi, M. Huson, C. Creighton, J. Khoo, L. Mazzola, T. Gengenbach, F. Jones, and B. Fox. Effect of surface functionality of PAN-based carbon fibres on the mechanical performance of carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 94:89–95, 2014.
- [144] X. Zhan, C. Gao, W. Lin, C. Gu, W. Sun, and Y. Wei. Laser Cleaning Treatment and its Influence on the Surface Microstructure of CFRP Composite Material. *Journal of Powder Metallurgy & Mining*, 6(1):1000165, 2018.

-
- [145] R. Naversnik. Niederdruck-Plasmatechnik zur Oberflächenvorbehandlung. *Plastverarbeiter*, 51, 2000.
- [146] Diener electronics GmbH + Co. KG. Atmosphärendruck- oder niederdruckplasma. *plasma.com*, URL: bit.ly/3hukxyA (Abruf: 05.12.2022), 2022.
- [147] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 527-2:2012-06 – Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen. *DIN e.v., Berlin*, 2012.
- [148] Grodno Khimvolokno. *Grodnamid PA6-GF30P-1, Datenblatt*.
- [149] KUKA Roboter GmbH. *Roboterprogrammierung 1, Schulungsunterlagen: P1KSS8 (R2) V5*, 2017.
- [150] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 2342:2003-05 – Gewindestift mit Schlitz mit Schaft. *DIN e.v., Berlin*, 2004.

Veröffentlichungen/Tagungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die folgenden Beiträge veröffentlicht:

- P. Bauer, Y. Becker, N. Motsch-Eichmann, K. Mehl, I. Müller, and J. Hausmann. Hybrid thermoset-thermoplastic structures: An experimental investigation on the interface strength of continuous fiber-reinforced epoxy and short-fiber reinforced polyamide 6. *Composites Part C: Open Access*, 3:100060, 2020.
- P. Bauer, N. Motsch-Eichmann, S. Schmeer, K. Mehl, I. Müller, and J. Hausmann. Hybrid thermoset-thermoplastic structures: An in-depth study on plasma pretreated continuous fiber-reinforced epoxy specimens. *Composites Part C: Open Access*, 8:100281, 2022.
- P. Bauer, N. Motsch-Eichmann, S. Schmeer, K. Mehl, I. Müller, and J. Hausmann (in press). A novel hybrid thermoset-thermoplastic robot-based production concept for lightweight structural parts: A special view on the hybrid Interface. In A. P. Vassilopoulos & V. Michaud (Ed.), *Proceedings of the 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20)*, Lausanne, Switzerland, pages 1275-1282, 2022.
- P. Bauer, N. Motsch-Eichmann, S. Schmeer, K. Mehl, J. Hausmann, and I. Müller. A novel hybrid thermoset-thermoplastic robot-based production concept for lightweight structural parts: A special view on 3d filament winding. In *5th International Conference Hybrid Materials and Structures 2022 - Book of Abstracts*, pages 15–22, 2022.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die folgenden Fachvorträge gehalten:

- P. Bauer, I. Müller, and A. Stieglitz. Robotergestütztes 3D-Faserwickeln - automatisierte Herstellung hoch belastbarer Strukturbauteile. *Leichtbau in Friedrichshafen (LiF)*, Friedrichshafen, Deutschland, 19. September 2019.
- P. Bauer, Y. Becker, N. Motsch-Eichmann, I. Müller, and J. Hausmann (Poster). Experimental Investigation of TS/TP Hybrid Structures. *4th International Conference Hybrid Materials and Structures*, Web-Conference, Germany, 28-29 April 2020.

- P. Bauer, K. Mehl, N. Motsch-Eichmann, S. Schmeer, I. Müller and J. Hausmann. A novel hybrid thermoset-thermoplastic robot-based production concept for lightweight structural parts: A special view on the hybrid interface. 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20), Lausanne, Switzerland, 26-30 June 2022.
- P. Bauer, N. Motsch-Eichmann, S. Schmeer, K. Mehl, J. Hausmann, and I. Müller. A novel hybrid thermoset-thermoplastic robot-based production concept for lightweight structural parts. 5th International Conference Hybrid Materials and Structures, Leoben, Austria, 20-22 July 2022.

Studentische Arbeiten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die folgenden studentische Arbeiten betreut.

Masterarbeit (MA)	30 ECTS
Bachelorarbeit (BA)	12 ECTS
Interdisziplinäre Projektarbeit (IDP)	8-16 ECTS

- F. Sill, D. Bellin, C. Brenner, T. Hettinger. Entwicklung & Fertigung eines CFK-Wickel-Bauteils. IDP, HS-Pforzheim, 2018.
- G. Salomon. Entwicklung eines Fadenspannungssystems für eine Roboterwickelanlage. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2019.
- S. Hornung. Untersuchung und Charakterisierung von Konzepten für Faden-trägersysteme (Kerne) für Fahrwerksbauteile im robotergestützten 3D-Faserwickelverfahren. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2020.
- A. Nazarov, S. Schöninger, B. Tomic. Entwicklung einer CFK-Achsstrebe im 3D-Wickelverfahren. IDP, HS Pforzheim, 2020.
- E. Grabowski. Optimierung der Prozessautomatisierung für die Serienherstellung eines hochbelasteten CFK-Vierpunktlenkers im roboterbasierten 3d-Faserwickelverfahren. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2020.
- M. Schaffranek. Entwicklung und Konstruktion einer Laboranlage zur Harz-Imprägnierung von Endlosfasern. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2020.
- R. Hörnle, M. Kritzer, A. Wirz. Entwicklung eines Leichtbau-Hockers. IDP, HS Pforzheim, 2020.
- M. Rahimy-Baroghy. Charakterisierung und Untersuchung von unterschiedlichen TowPreg-Materialien für das robotergestützte 3D-Faserwickelverfahren. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2020.

- C. Hartmann, P. Heuchele, G. Kühn, N. Rampp. Entwicklung, Fertigung und Test eines Anbindungskonzeptes für den Leichtbaugepäckträger "Carter". IDP, HS Pforzheim, 2020.
- I. Dittus, J. Schwarz, A. Kapp. Entwicklung eines Fadenauges und einer Fadenumlenkung zur Führung eines CFK-TowPregs. IDP, HS Pforzheim, 2020.
- A. Köppl, E. Kretzschmar, T. Haarer. Entwicklung & Fertigung eines Hybrid-Kettenblattes für einen Fahrradtrieb. IDP, HS Pforzheim, 2021.
- A. Hartung. Entwicklung und Umsetzung eines Fadenspannungssystems zum Wickeln 3-dimensionalen Bauteilen [sic] mit Hilfe einer TowPreg-Roboterwickelanlage. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2021.
- C. Notter, A. Schnürle. Fertigungsentwicklung für einen Leichtbau-Hocker im 3d-Faserwickelverfahren. IDP, HS Pforzheim, 2021
- S. Mörmann. Entwicklung, Konstruktion, Simulation & Fertigungsplanung einer Vollcarbon-Felge für einen Formula Student Rennwagen. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2021.
- P. Scheckies. Entwicklung und Konstruktion eines Systems zur gezielten und variablen Einstellung des Faservolumengehaltes an einer Towpreg-Anlage. Masterarbeit, HS Aalen, 2021.
- M. Frank, V. Haug, T. Scheible. Entwicklung, Fertigung und Test von Hybrid-Kettenblatt Prototypen eines Einfachantriebes. IDP, HS Pforzheim, 2021.
- E. Schütt, T. Seiter, T. Weber. Roboterbasierte Fertigung eines Leichtbau-Hockers im 3d-Faserwickelverfahren. IDP, HS Pforzheim, 2022.
- A. Schnürle. Entwicklung und Konstruktion einer CFK-Rennradkurbel aus TowPreg mit Hilfe des automatisierten 3D-Wickelverfahrens. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2022.
- J. Sabisch. Konstruktion einer elektr. Imprägniereinheit und Entwicklung einer zentralen Bedieneinheit für eine TowPreg-Anlage. Bachelorarbeit, HS Pforzheim, 2022.

Curriculum vitae

Beruflich

- seit 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter. Hochschule Pforzheim, Lehrstuhl für Festigkeitslehre und Leichtbau.
- 2017-2021 Dozent im Bereich Maschinenbau (TM/FL). DHBW Ravensburg, Campus Friedrichshafen.
- 2014-2017 Fachpraktikum/Bachelorarbeit/Werkstudent. ZF Friedrichshafen AG, F&E, Friedrichshafen.

Akademisch

- 2015-2017 Fahrzeug- und Motorentechnik. Universität Stuttgart. Abschluss: M.Sc.
- 2011-2015 Fahrzeugtechnik. Technische Universität Ilmenau. Abschluss: B.Sc.

Schulisch

- 2002-2011 Arnold-Gymnasium. Neustadt b. Coburg. Abschluss: Allgemeine Hochschulreife.